

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Aplicação de um Método para Análise Estática de Estabilidade de Tensão

Dissertação submetida como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

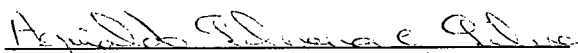
Flávio Antonio Becon Lemos


FLORIANÓPOLIS, MAIO DE 1994

**APLICAÇÃO DE UM MÉTODO PARA ANÁLISE ESTÁTICA
DE ESTABILIDADE DE TENSÃO**

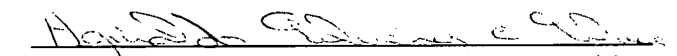
Flávio Antonio Becon Lemos

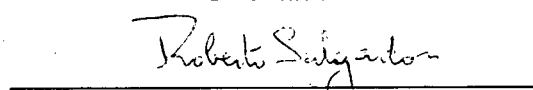
'Esta dissertação foi julgada para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica,
Área de Concentração em Sistema de Potência,
e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação '


Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D
Orientador

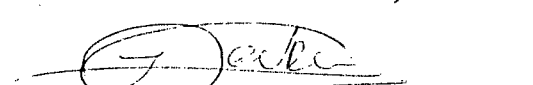

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D
Coordenador do Curso

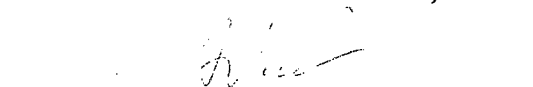
Banca Examinadora


Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D - Presidente
Orientador


Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D
Co-Orientador


Prof. Hanz Helmut Zörn, Ph.D


Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc


Prof. Arjovaldo Garcia, D.Sc

A meus Pais, pelo exemplo de dedicação e experiência de vida transmitida.

A Ana Carina, companheira e amiga de todas as horas e situações, que soube superar a distância e sem a qual, certamente, a realização deste trabalho teria sido muito mais difícil.

Agradecimentos

Aos professores Aguinaldo Silveira e Silva e Roberto de Souza Salgado meu agradecimento especial pela orientação, dedicação e amizade demonstradas durante todo o tempo de desenvolvimento deste trabalho.

A Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul pelo apoio concedido, e ao professor Guilherme Dias pelo empenho para a realização deste trabalho.

A Capes pelo apoio financeiro.

Aos colegas engenheiros da CEEE, Lucas, Nelson e Werberich pela amizade, incentivo, apoio e demonstração do exemplo do verdadeiro senso profissional na busca do aprimoramento técnico e humano.

Ao colega David pelo apoio e amizade demonstradas durante o convívio na pós-graduação, principalmente quando a persistência parecia terminar no encontro das soluções, e ao colega André pelo apoio na parte de implementação computacional.

Ao Departamento de Engenharia de Sistemas da CEEE pela cedência dos dados usados neste trabalho.

Aos professores e colegas da pós-graduação, que direta ou indiretamente contribuíram com incentivo e amizade.

E, finalmente, a Deus, sem o qual a busca do desconhecido seria em vão, e o crescimento humano sem significado.

Resumo

Este trabalho aborda o problema do colapso de tensão, cuja ocorrência em vários sistemas elétricos tem exigido o desenvolvimento de métodos para a detecção de sua proximidade assim como para a determinação de medidas corretivas.

Uma metodologia baseada na Decomposição em Valores Singulares é proposta para a análise estática do problema de estabilidade de tensão, utilizando o mínimo valor singular como um índice de colapso de tensão. Os vetores singulares esquerdo e direito, associados ao mínimo valor singular, são usados para a obtenção de informações sobre quais áreas e barras são as mais críticas em relação a problemas de instabilidade de tensão. É também apresentado um método para o cálculo de fluxo de potência, chamado Newton-Raphson com amortecimento, que serve para estudar o sistema em torno do ponto de colapso de tensão.

Apresenta-se ainda a modelagem dos componentes do sistema de potência para estudos de fluxo de potência, com ênfase em modelos estáticos de carga para estudo de estabilidade de tensão.

O método foi aplicado ao sistema teste IEEE de 30 barras e a um sistema real de 96 barras, operado pela Companhia Estadual de Energia Elétrica, e correspondente a região oeste do Rio Grande do Sul.

Os resultados comprovam a potencialidade da abordagem proposta para a detecção e identificação de áreas sujeitas ao colapso de tensão em estudos de planejamento e operação.

Abstract

This work tackles the problem of voltage collapse which has occurred in several power systems and has required the development of methods for detection of its proximity as well as for the determination of corrective actions.

A method based on the Singular Value Decomposition is proposed for the static analysis of the voltage stability problem, using the minimum singular value as a voltage collapse index. The right and left singular vectors are used to obtain information about the most critical areas and busbar subject to voltage instability problems. Besides that, a method for load flow calculation called Damped Newton-Raphson is presented to allow the study of the system around the point of voltage collapse.

The modelling of power systems components for load flow studies with emphasis on the static load models for voltage stability studies is presented.

The method is applied to the IEEE 30 busbars test-system and to a real sub-system with 96 busbars, the latter managed by the Companhia Estadual de Energia Elétrica, corresponding to the western region of Rio Grande do Sul, Brazil.

The results confirm the potential of the proposed approach for detection and identification of the critical areas subject to voltage collapse in both planning and operation studies.

Sumário

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Simbologia	xi
1 <u>Introdução</u>	1
2 O Problema Estabilidade de Tensão	5
2.1 Definições Preliminares	5
2.2 Revisão Bibliográfica	9
2.2.1 Abordagem Estática	11
2.2.2 Abordagem Dinâmica	15

2.3 Conclusão	17
3 Fundamentos Teóricos	18
3.1 Formulação do Problema	18
3.2 Singularidade da Matriz Jacobiana como um Índice de Colapso de Tensão - Caso Simple	23
3.3 Sistemas Multimáquinas	25
3.4 Modelagem dos Componentes	27
3.4.1 Geradores, Sistema de Transmissão e Elementos Shunt	28
3.4.2 Carga	28
3.4.2.1 Tipos de Representação de Carga	31
3.5 Conclusão	35
4 Metodologia Proposta	36
4.1 Decomposição em Valores Singulares	37
4.1.1 Aplicação	37
4.1.2 Matrizes Derivadas da Jacobiana	43
4.1.2.1 Matriz G	43
4.1.2.2 Matriz Gv	45
4.2 Método de Newton-Rapshon Amortecido	46
4.2.1 Desenvolvimento Teórico	47
4.3 O Uso ds Relações de Sensibilidade	52
4.3.1 Desenvolvimento	52
4.4 Conclusão	53

5 Resultados Numéricos	55
5.1 Introdução	55
5.2 Formas de Análise	56
5.3 Sistema IEEE-30	57
5.3.1 Carga Modelada como Potência Constante	58
5.3.2 Carga Modelada como Impedância Constante	63
5.4 Sistema CEEE-Oeste	68
5.5 Conclusão	73
6 Conclusões	75
6.1 Sugestões para Futuros Trabalhos	79
Bibliografia	81
Apêndice A1 - Programas	89
Apêndice A2 - Sistemas IEEE 30 - Diagrama Unifilar	93
Apêndice A3 - Sistema CEEE-Oeste - Diagrama Unifilar	94

Simbologia

Abreviaturas

CEEE-RS	: Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul .
RAT	: Regulador automático de tensão.
RAV	: Regulador automático de velocidade.
LTC	: Transformador com mudança de tap sob carga.
PSS	: Estabilizador de sistema de potência.

Simbologia

V_g	: Tensão no gerador .
V_r	: Tensão na carga.
V_i e V_k	: Módulo das tensões de barra.
δ_i e δ_k	: Ângulo das tensões de barra.
P_r , P	: Potência ativa na carga.
Q_r , Q	: Potência reativa na carga.
Z	: Impedância da linha de transmissão.
R	: Resistência da linha de transmissão.

X	: Reatância da linha de transmissão.
G_{ik}	: Condutância da linha de transmissão.
B_{ik}	: Susceptância da linha de transmissão.
α	: Ângulo da impedância da linha de transmissão.
δ	: Ângulo da tensão na carga.
λ	: Fator de amortecimento.
Σ	: Matriz diagonal dos valores singulares.
U	: Autovetor esquerdo.
V	: Autovetor direito.

Operadores

∇	: Gradiente.
∂	: indica diferencial parcial.
d	: indica diferencial total.
Δ	: indica variação incremental de uma grandeza.
$()^T$: indica transposta de uma matriz.
$()^{-1}$: indica inversa de uma matriz.

Capítulo 1

Introdução

A operação de um sistema elétrico de potência requer que o perfil de tensão seja mantido dentro de uma faixa de valores aceitáveis. Entretanto, se ocorrer um crescimento da carga reativa, ou seguir-se uma contingência que cause um aumento de demanda reativa, tal como efeito dos incrementos de perdas em uma linha de transmissão importante, aumento de demanda reativa devido a motores de indução ou ainda devido a perda de suporte reativo proporcionada por capacitores estáticos, poderá ocorrer um fenômeno chamado instabilidade de tensão. Essencialmente, um sistema entra em instabilidade de tensão quando um distúrbio causa um progressivo e descontrolado declínio no perfil de tensão nas barras do sistema, ou ainda, pode-se dizer que a instabilidade de tensão é causada pela inabilidade do sistema em suprir a demanda de potência reativa.

Os aspectos relacionados à estabilidade de tensão são hoje, em muitos países, uma das maiores preocupações no planejamento e operação de sistemas de potência, sendo considerados atualmente como a principal ameaça à estabilidade, segurança e confiabilidade dos sistemas elétricos e têm dominado a atenção dos profissionais atuantes na área de sistemas de potência em vários países. As razões disto são: a falta de investimento na expansão da malha de transmissão, os problemas ambientais

na construção de novas unidades geradoras e ainda o tempo necessário para que cada obra de melhoria no sistema elétrico leva para ser planejada e executada .

Durante a última década, aconteceram alguns dos maiores blecautes causados por instabilidade de tensão. Dentre essas ocorrências, estão os colapsos no sistema da França em 1978 e 1987[1], da Suécia em 1983[1] e do Japão 1987[1] e o blecaute no norte da Bélgica em 1982[1].

Estas ocorrências têm permitido que se analisem algumas causas de colapso de tensão, identificando alguns fatores importantes para o estudo de estabilidade de tensão. Dentre as principais razões atribuídas à ocorrência deste fenômeno, as seguintes têm sido freqüentemente citadas:

- Sistemas de potência sobrecarregados, isto é, altas cargas ativas e reativas no sistema, devido ao aumento no consumo não ser seguido pelo aumento da capacidade de geração e transmissão ;
- Fontes de potências reativas de resposta rápida inadequadas, devido à ação limitadora de corrente nos geradores, o que não permite que haja sobreexcitação por curtos períodos de tempo para manter níveis de tensão aceitáveis;
- Fontes geradoras longe dos grandes centros consumidores, determinando a transmissão em altas tensões, o que causa um aumento na queda de tensão;
- Atuação dos LTC's, muitas vezes mascarando o problema de tensão, pois existe uma compensação na tensão de distribuição, fazendo com

que a carga seja mantida, ao passo que a tensão a nível de transmissão encontra-se em valores críticos;

- operação de relés imprevista e/ou indesejada que pode ocorrer durante as condições em que há queda de tensão, o que pode originar um colapso de tensão pela perda de algum equipamento em uma área com geração importante para manter os níveis de tensão do sistema.

A estabilidade de tensão tem sido estudada tanto sob o ponto de vista estático quanto dinâmico, sendo a escolha da abordagem dependente do tipo de análise a ser efetuada e da necessidade de modelagem mais detalhada para representar a ocorrência de um colapso de tensão.

Este trabalho propõe o uso da técnica de decomposição de uma matriz em valores singulares (SVD- Singular Value Decomposition) para a determinação de um índice de estabilidade de tensão, e de barras críticas sujeitas à ocorrência de instabilidade de tensão. Esta técnica é aplicada à matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional, e a outras matrizes derivadas da Jacobiana. Adicionalmente, a análise de sensibilidade da matriz Jacobiana permite determinar a relação de efeitos entre as variáveis das barras mais sujeitas à instabilidade de tensão. Também é apresentado um algoritmo para a solução do problema de fluxo de potência, chamado Newton Amortecido, o qual previne a divergência do processo iterativo, nos casos em que o sistema está sujeito a tensões de valores muito baixos. Isto possibilita o estudo da evolução do perfil de tensão durante a ocorrência de instabilidades no sistema.

No capítulo 2, o problema de estabilidade de tensão é apresentado. São descritos o mecanismo, os termos e as definições aplicados ao estudo de estabilidade de

tensão sob os pontos de vista estático e dinâmico. Também é apresentada uma revisão bibliográfica de diversos trabalhos relacionados ao tema.

No capítulo 3, apresenta-se uma abordagem teórica do problema sob o ponto de vista estático, descrevendo-se o mecanismo de colapso de tensão sob o ponto de vista da teoria de circuitos e da máxima transferência de potência, e a descrição da modelagem dos componentes para os estudos de estabilidade de tensão, com ênfase na modelagem da carga.

No capítulo 4 são apresentados o método da decomposição em valores singulares da matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional via Newton-Raphson, o uso da sensibilidade como forma de determinação das variáveis que mais influenciam as barras potencialmente mais sujeitas ao colapso de tensão e o desenvolvimento do algoritmo de cálculo de fluxo de potência através do método de Newton Amortecido.

O capítulo 5 mostra a aplicação da técnica proposta sob o ponto de vista estático, apresentando-se os resultados das simulações com sistemas de diferentes portes.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para futuros desenvolvimentos nesta área.

Capítulo 2

O Problema Estabilidade de Tensão

Apresentam-se inicialmente neste capítulo, alguns termos e definições úteis para a compreensão do fenômeno de estabilidade de tensão. Em seguida, é feita uma revisão bibliográfica dos trabalhos mais citados na literatura, sob os pontos de vista estático e dinâmico.

2.1 Definições Preliminares

A fim de compreender melhor o significado do mecanismo de estabilidade de tensão, é necessário observar três termos básicos que têm sido utilizados pelo IEEE [1] e pelo CIGRE [2], para descrever os problemas relacionados as situações anormais da tensão no sistema elétrico.

- Estabilidade de Tensão : é a habilidade do sistema em manter a tensão de modo que, estando o sistema operando num ponto estável e sendo sujeito a um dado distúrbio, a tensão no sistema pós-distúrbio atingirá um valor de equilíbrio.

- **Colapso de Tensão** : é o processo que segue a uma instabilidade de tensão, sendo que um sistema de potência sofrerá colapso se a tensão de equilíbrio pós-distúrbio próxima às cargas estiver abaixo de um valor aceitável de operação. O colapso de tensão pode atingir todo o sistema (blecaute), sendo neste caso chamado de total, ou somente uma área, sendo nesta condição chamado de parcial.

- **Segurança de Tensão** : é a habilidade do sistema, não somente de operar de forma estável, mas também de permanecer nesta condição após uma contingência de grande porte ou após mudanças adversas no sistema.

Portanto, pode-se estabelecer que um sistema entra em estado de instabilidade de tensão quando o distúrbio, aumentando a carga ou ocorrendo alguma contingência no sistema, causa queda de tensão rapidamente ou tem uma tendência descendente, e os operadores e os sistemas de controle automáticos falham ao tentar deter esta queda. A queda do perfil de tensão pode levar alguns poucos segundos ou vários minutos (10 a 20 minutos). Se a queda persistir, a instabilidade angular de regime permanente e o colapso de tensão irão ocorrer.

O assunto estabilidade de tensão é relativamente recente, pois passou a merecer maior atenção a partir da década de 70. A fim de ser inserido no estudo relativo à estabilidade, é necessária a classificação das diversas fases do fenômeno em classes de tempo. Uma possível classificação foi proposta por C. W. Taylor [3], a qual divide a estabilidade em três fases:

- **Estabilidade Transitória de Tensão** : a qual está associada ao regime transitório do sistema e envolve prazos de tempo de 0 a 10 segundos. A distinção entre a instabilidade de ângulo do rotor e a instabilidade de tensão nem sempre é clara, e aspectos

de ambos os fenômenos podem existir. Nesta condição, não é possível ação de controle nem mesmo do operador, sendo o comportamento do sistema determinado por suas próprias características.

- Estabilidade Clássica de Tensão : a qual está associada a ação automática dos taps de transformadores e da regulação da tensão de distribuição, assim como à limitação da corrente de excitação dos geradores, envolvendo prazos de tempo de 1 a 5 minutos, (usualmente de 1 a 2 minutos). A intervenção do operador nestes casos é usualmente possível. Esta condição em geral envolve cargas pesadas, grandes importações de potência de geração remota e grandes distúrbios. O sistema é estável sob o ponto de vista transitório por causa das cargas dependentes da tensão, mas pode entrar em colapso alguns minutos depois, após cessarem as trocas de taps, a capacidade de sobreexcitação das unidades geradoras e o equilíbrio de tensão por perda de carga devido à atuação de esquemas de proteção. A geração e o sistema de transmissão não conseguem mais suportar a carga e as perdas reativas, levando desta forma o sistema ao colapso de tensão.

- Estabilidade de Tensão de Longo Prazo : associada a incidentes envolvendo prazos de dezenas de minutos a horas de depreciação do valor da tensão. As características deste cenário incluem cargas anormalmente pesadas, rápido aumento de carga, perda de geração em áreas de concentração de carga e importação de potência. Além das características do cenário de estabilidade clássica, fatores que podem estar incluídos são : o tempo de capacidade de sobrecarga em linhas de transmissão (dezenas de minutos), diversidade da perda de carga (por exemplo, cargas controladas por termostatos, as quais demoram a serem desligadas por baixa tensão), oportunidade na aplicação de equipamentos visando controle de tensão/reativos, esquemas de proteção por subtensão e outras intervenções do operador, tais como o corte de carga manual.

Torna-se interessante fazer algumas observações acerca de algumas definições de estabilidade em regime permanente e estabilidade de tensão. Embora as definições e relações sobre estes termos não estejam ainda claras na literatura, tem-se procurado seguir algumas linhas de pensamento para tentar normalizar estas definições [1], [6].

Na referência [4] são apresentadas algumas definições clássicas de estabilidade em regime permanente e a sua relação com o problema de estabilidade de tensão. Além disso, uma análise deste fenômeno sob o aspecto dos limites de estabilidade é realizada. A primeira definição apresentada é a clássica apresentada por Kimbark [5], referindo-se ao limite da estabilidade em regime permanente. Ela é estabelecida da seguinte maneira: " Quando a carga é aumentada em pequenos degraus e a corrente de excitação da máquina é ajustada para manter a tensão terminal constante, a máxima potência que pode ser recebida pela carga, sem que ocorra a perda de sincronismo e o sistema restaure a condição normal de operação é chamado limite de estabilidade em regime permanente".

Outra definição referenciada por Prada em [4] é aquela sugerida anteriormente pelo IEEE [6], a qual determina que "o limite da estabilidade em regime permanente é o ponto normal de operação para o qual o sistema de potência é estável, porém uma pequena mudança arbitrária qualquer no ponto de operação em uma direção desfavorável causa uma perda de estabilidade".

A referência [4] comenta esta definição de estabilidade sob o ponto de vista da causa, afirmando que : " a instabilidade também pode ser causada por insuficiência de reativos, resultando em um colapso de tensão ainda que existam torques de amortecimento e sincronizante". Para descrever esta situação é proposto o termo instabilidade de tensão.

Pode-se avaliar, pelas colocações feitas anteriormente, que as definições clássicas e propostas para estabilidade em regime permanente e estabilidade de tensão ainda requerem um aprofundamento para seu correto entendimento.

2.2 Revisão Bibliográfica

Desde o surgimento do problema, várias tentativas têm sido feitas para estabelecer "Indicadores de Proximidade".

Na figura 2.1, uma curva PV típica é usada para demonstrar esquematicamente três tipos de índices propostos na literatura e usados em vários trabalhos [20]. Basicamente, estes índices avaliam o comportamento dos seguintes parâmetros :

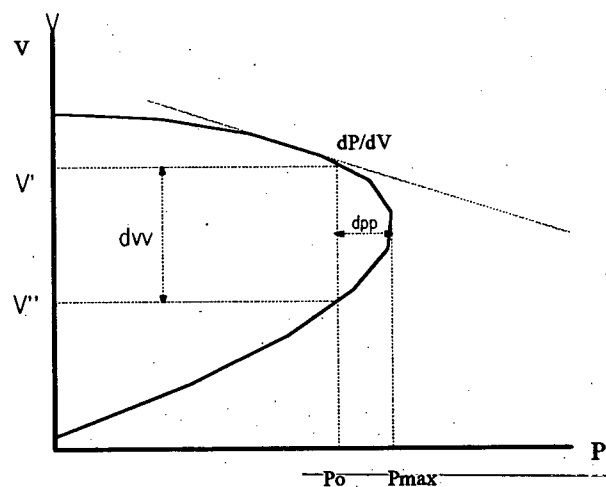


Figura 2.1 - Curva PV típica

(1) Medida da proximidade da distância entre a parte superior e a parte inferior da curva ($dv_v = V' - V''$) a zero. Este índice é usado para determinar as múltiplas soluções [8],[9]. Conforme pode ser observado na figura 2.1, exceto no ponto crítico, onde

$dv_v=0$, para cada valor de potência ativa corresponde um par de níveis de magnitude de tensão (P_0 , V' , V'' , por exemplo) .

(2) Medida da proximidade da diferença $P_{\text{máx}} - P_0 = \text{dpp}$ a zero. Desta forma, semelhante ao caso anterior, quanto mais elevado for o índice dpp, maior a distância do ponto crítico $\text{dpp}=0$, o qual indica que a quantidade máxima de potência ativa foi atingida. Um indicador similar pode ser obtido usando-se a diferença de potência reativa ($Q_{\text{máx}} - Q_0$) ou a diferença de potência aparente ($S_{\text{máx}} - S_0$). Estes índices são conhecidos como índices tipo margem [11],[12],[13],[14].

(3) Medidas da proximidade da derivada $\frac{\partial P}{\partial V}$ a zero, a qual no ponto crítico $\frac{\partial P}{\partial V} = 0$ implica em que o determinante da matriz Jacobiana não existe, ou de outra forma que o menor autovalor, ou alternativamente o menor valor singular, estão próximos de zero [15],[16],[17],[18],[19],[20][23].

Os primeiros dois índices fazem uso de procedimentos iterativos para avaliar o intervalo de potencial deslocamento da variável elétrica em estudo, e com isto obter uma medida da margem de estabilidade através da diferença de tensão (dv_v) ou diferença de potência (dpp).

O terceiro índice é obtido através do cálculo direto, usando a matriz Jacobiana do fluxo de potência. Esta característica, junto com técnicas numéricas para resolver problemas de autovalores ou decomposição em valores singulares, tem se mostrado eficaz na avaliação da condição de estabilidade de tensão em sistemas elétricos [15],[16],[17],[18],[19],[20],[23].

A análise da bibliografia relativa à estabilidade de tensão ou ao colapso de tensão, mostra que existe um grande número de linhas de pesquisa, tais como soluções

múltiplas de fluxo de carga, unicidade da solução, ausência de solução, perda da causalidade, ponto de bifurcação, matriz Jacobiana singular, mínimo valor singular, ponto regular, ponto de equilíbrio, divergência do algoritmo de fluxo de potência sem que haja um consenso sobre qual o tipo de análise mais adequado. Contudo, é possível observar algumas tendências ao uso de determinadas ferramentas computacionais que têm se mostrado eficazes, apesar de que alguns conceitos sobre o colapso de tensão ainda necessitem serem melhor explicados.

A seguir é feita uma revisão de alguns trabalhos citados na literatura, considerados importantes para o desenvolvimento do presente trabalho.

2.2.1 Abordagem Estática

Diversos trabalhos consideram que o colapso de tensão pode ser tratado como um fenômeno estático. Uma das razões para esta consideração, é a lenta variação da tensão ao longo do tempo até que se manifestem problemas de ordem operativa. Embora isto nem sempre seja verdadeiro, esta forma de análise é muito importante, pois fornece subsídios de caráter conceitual que servem para um melhor entendimento do referido fenômeno.

Em 1975, Venikov e outros [7] demonstraram que sob certas condições, existe uma relação direta entre a singularidade da matriz jacobiana do fluxo de potência Newton-Raphson convencional e a singularidade da matriz dinâmica de estado do sistema. A partir disto, foi sugerido que a mudança do sinal do determinante da matriz Jacobiana do fluxo de potência via Método de Newton poderia ser usada como um indicativo da instabilidade de tensão do sistema.

Tamura, Mori e outros [8], e Abe e outros [9], propõem a proximidade das múltiplas soluções do fluxo de potência como um indicador de instabilidade de tensão, determinando qual a tensão do par de tensões obtidas é estável para o sistema.

Kessel e Glavitsch [10] usam um indicador global, o qual é definido como uma medida quantitativa da proximidade da distância estimada do colapso de tensão, e mostram que a perda de estabilidade do sistema pode ocorrer como um abrupto aparecimento de oscilações autosustentadas ou um súbito desaparecimento do ponto de equilíbrio (bifurcação estática) [32].

Schlueter e outros [11] estabelecem que a medida da proximidade do colapso de tensão é indicada pela reserva de transmissão de reativos em uma área limitada, fazendo uso de matrizes de sensibilidade do sistema e da análise de controlabilidade da curva PV para determinar uma margem. Ainda nesta linha, T. Van Cutsem [12] apresenta uma proposta para calcular a margem de potência reativa para um conjunto de barras de carga do sistema, utilizando técnicas de otimização. A diferença entre a máxima carga reativa e carga do caso base é apontada como uma margem para estabelecer a robustez do sistema em relação ao colapso de tensão.

Flatabo, Ognedal e Carlsen [13] propõem o uso de técnicas de sensibilidade, levando em conta o limite e a capacidade de geração de potência reativa. Dentro deste contexto, Begovic e Phadke [14] analisam o efeito da compensação estática no limite da estabilidade de tensão para vários cenários de carga, usando relações de sensibilidade para a melhor localização dos elementos de compensação. A estabilidade de tensão é estudada através da avaliação do mínimo valor singular da Jacobiana e o total de potência reativa gerada é calculado como um indicador de margem de estabilidade.

Thomas e Tiranuchit [15] propõem o mínimo valor singular da matriz Jacobiana do fluxo de potência como um índice para determinar a estabilidade de tensão em regime permanente. Baseado nesta proposição, Löf, Hill e outros [16],[17] sugerem o

uso do mínimo valor singular de submatrizes derivadas da matriz Jacobiana como um índice de estabilidade estática de tensão, indicando a distância entre o ponto de operação estudado e o limite da estabilidade estática de tensão. Estes últimos fazem adicionalmente uso dos vetores singulares obtidos da decomposição como fatores de informação das barras críticas e distúrbios sob o ponto de vista de instabilidade de tensão. Ainda utilizando o mesmo tipo de abordagem, Srivastana, Srisvastana e Kalra [18] estendem a técnica de decomposição em valores singulares para realizar a análise da estabilidade de tensão de um sistema CA-CC.

Na referência [19], Gao, Morison e Kundur utilizam técnicas de análise modal com fatores de participação para estudar a estabilidade de tensão, e fazem uso da matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional. Dentro desta linha, Kundur, Morison e Gao [37] fazem uma descrição sobre colapso de tensão e seu mecanismo, apresentando estudos referentes à modelagem de componentes da rede para análise estática e dinâmica, fazendo ainda comparações dos resultados obtidos por ambas as abordagens. São ainda discutidas ações de controle preventivo para evitar o colapso de tensão.

Em [20], Vargas e Quintana apresentam um método o qual realiza uma estimação do menor autovalor do sistema, e estabelece subsistemas para análise de seus respectivos autovalores, através do estabelecimentos de critérios de coerência, baseados na sensibilidade da tensão entre duas barras.

Canizares e Alvarado [21] analisam o sistema pontencialmente sujeito ao colapso de tensão sob o ponto de vista do aparecimento de bifurcações do tipo "ponto de sela" para detectar a singularidade em regime permanente. É proposto nesta referência um método para a análise integrada de sistemas CA/CC quantitativa e qualitativamente.

Kwatny e outros [22] estudam o problema caracterizando a bifurcação estática por um desaparecimento do ponto de equilíbrio e mostram como a bifurcação pode descrever instabilidade de tensão e ângulo.

A referência [1], procura dividir os métodos usados para a análise da estabilidade de tensão em grupos baseados em : sensibilidade, mínimo valor singular e múltiplas soluções. Encontram-se ainda na literatura, trabalhos que sugerem o uso de autovalores e técnicas de otimização estática para determinar a proximidade do colapso de tensão. Como forma de simplificação e condensação dos trabalhos de acordo com a técnica utilizada, mostra-se a seguir uma possível classificação, e uma breve descrição do tipo de abordagem utilizada. A maior parte dos trabalhos referenciados se enquadra nesta classificação, sendo que alguns deles aplicam mais do que uma das técnica citadas para obter seus resultados.

- **Múltiplas soluções** : Neste tipo de abordagem procura-se determinar os pontos onde as equações não lineares da rede possuem múltiplas (duas) soluções. Geralmente utiliza-se o método de Newton em coordenadas retangulares, que é considerado mais adequado para esta finalidade. Esses pontos caracterizam a vulnerabilidade do sistema a problemas de tensão. Objetiva-se determinar qual das soluções é estável, e qual o valor de tensão em torno da região de instabilidade que pode ser aceitável para a operação [8],[9].

- **Sensibilidade** : Esta abordagem é baseada na determinação de uma relação de sensibilidade entre as variáveis do sistema elétrico através das equações linearizadas do fluxo de potência para um certo intervalo de carga. Visa-se obter a indicação de quais dispositivos fornecedores de potência reativa estão no limite, e quais áreas estão sujeitas ao colapso por falta de suporte reativo [11],[12],[13],[14].

- **Mínimo Valor Singular** : Métodos baseados nesta abordagem procuram determinar a vizinhança do ponto de operação do sistema onde ocorre a

bifurcação estática, isto é, o ponto onde o determinante da matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional é zero. Neste caso não existe solução viável para as equações do fluxo de potência, o que caracteriza o colapso de tensão [14],[15],[16],[17],[18],[23].

- Autovalores : Neste tipo de técnica, também conhecida como análise modal, procura-se associar um número específico de pequenos autovalores com modos da variação tensão/potência reativa. O objetivo é fornecer uma medida relativa da proximidade da instabilidade de tensão, sendo a análise feita geralmente em áreas sujeitas à esta instabilidade [19],[20].

- Otimização : Este tipo de método procura identificar o ponto de bifurcação diretamente pela maximização da carga reativa que pode ser suprida pelo sistema sem que ocorra perda da estabilidade de tensão [12]. Este tipo de abordagem tem sido pouco explorada na literatura.

2.2.2 Abordagem Dinâmica

O enfoque dinâmico de estabilidade de tensão não possui tantas referências quanto o enfoque estático. A razão disto está na complexidade exigida para a modelagem dos componentes do sistema de potência e no tipo de algoritmo a ser utilizado para a análise. Embora se saiba que a característica do colapso de tensão é não-linear e dinâmica, um grande número de abordagens tem procurado fazer uso de técnicas lineares de análise, o que facilita a implementação de algoritmos já consagrados (menor autovalor, fatores de participação, etc...). Estudos que usam modelos dinâmicos para o sistema de potência, incluem efeitos de LTC's, dinâmica de geradores e seus controladores (RAT, RAV, ESP), compensadores estáticos, e principalmente a dinâmica das cargas, já que seu

comportamento é de fundamental importância para a determinação do comportamento do sistema frente a estabilidade de tensão.

Alguns dos principais trabalhos citados na literatura são sumarizados a seguir:

Löf, Hill e outros [23] colocam neste artigo algumas idéias desenvolvidas em outros trabalhos dos autores [16],[17], e propõe algumas definições relacionadas ao fenômeno de estabilidade de tensão, tanto do ponto de vista estático, quanto dinâmico. É também apresentado neste trabalho um modelo de sistema de potência para estudo de estabilidade de dinâmica lenta onde são incluídos limitadores de corrente do rotor e cargas dinâmicas não lineares.

Sauer e Pai [24] apresentam uma relação entre o modelo dinâmico do sistema de potência e o modelo do fluxo de potência convencional, fazendo uma análise do modelo dinâmico linearizado. Este trabalho é um aprofundamento do trabalho apresentado por Venikov e outros [7]. No artigo publicado por Rajagopalan, Lesieutre, Sauer e Pai [25] o problema de estabilidade de tensão é colocado sob o aspecto dinâmico de operação do sistema, sendo feita a análise com base na estabilidade dos pontos de uma curva PV típica. A análise de múltiplos pontos de equilíbrio é feita no contexto da estabilidade de pequenas perturbações, usando técnicas de análise por autovalores.

Xu e Mansour [26] investigam a natureza dinâmica do colapso de tensão usando um modelo genérico para representar o comportamento dinâmico das cargas agregadas. Relações entre as técnicas estáticas de fluxo de potência e simulações dinâmicas no tempo são analisadas, e um mecanismo de colapso de tensão é visto como uma interação entre as cargas dinâmicas e a capacidade de fornecimento de potência pela rede.

Morison, Gao e Kundur [27] apresentam neste artigo uma comparação entre as abordagens estática e dinâmica. Para o estudo de colapso de tensão sob o aspecto estático é usada a análise modal, e para a abordagem dinâmica é usado o ETMSP [2] .

Stubbe, Bihain e Deuse [28] analisam o mecanismo do colapso de tensão para um sistema real, e concluem que é necessário um refinamento no detalhe dos modelos usados na simulação. São apresentados ainda neste artigo as características principais das modificações introduzidas no programa de simulação Eurostag, [2].

2.3 Conclusão

Foram colocadas neste capítulo algumas definições básicas para o entendimento do colapso de tensão[1],[2],[4],[6]. Como pode ser observado, o problema não está ainda claramente definido, e estudos mais aprofundados serão necessários até que o problema seja perfeitamente compreendido.

As curvas PV tem sido usadas como uma maneira de demonstrar o efeito do limite de potência ativa (ou reativa) transmitida no fenômeno de instabilidade de tensão.

Embora o colapso de tensão seja um fenômeno naturalmente dinâmico, muitos pesquisadores [8] a [22] adotam uma abordagem estática para sua determinação, estando ainda indefinida a melhor abordagem, bem como o tipo de método a ser utilizado. A abordagem dinâmica tem sido mais usada para estudos de comportamento de dinâmica lenta, visando a adoção de medidas preventivas, como por exemplo, o estabelecimento de trip dos relés de subtensão visando o corte de carga para controle da instabilidade de tensão, ao passo que os métodos estáticos são mais utilizados para indicar regiões e barras mais sujeitas à instabilidade de tensão[37].

No próximo capítulo será apresentado o mecanismo do colapso de tensão e seu desenvolvimento matemático.

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos

Apresenta-se inicialmente neste capítulo o mecanismo do colapso de tensão para um sistema radial. Em seguida, apresenta-se uma forma de uso da singularidade da matriz Jacobiana como um índice possível para a determinação do colapso de tensão, partindo-se de um caso simples de duas barras, e posteriormente considerando-se um sistema multimáquinas. Descreve-se também a modelagem dos componentes usados para o cálculo do fluxo de potência para a abordagem estática do estudo de estabilidade de tensão.

3.1 Formulação do Problema

O mecanismo de colapso de tensão pode ser inicialmente apresentado através de um sistema simples, de duas barras, cujo diagrama é apresentado na figura 3.1.

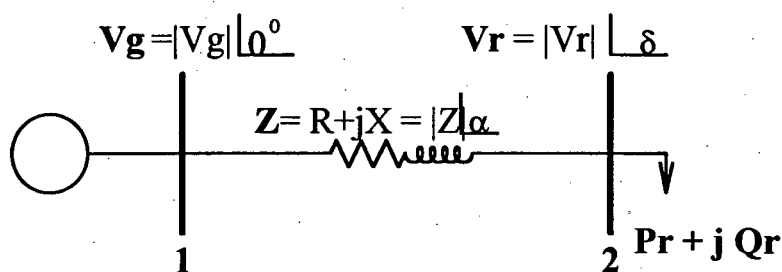


Figura 3.1 Sistema de duas barras

Neste circuito, a tensão V_g do gerador está em série com a impedância Z da rede, representando um equivalente Thevenin ligado a carga. O modelo de carga conectado é representado como potência constante ($P_r + jQ_r$), e está submetido a uma tensão V_r , sendo δ o ângulo da tensão na barra 2 e α o ângulo da impedância da linha de transmissão.

As equações algébricas que representam este circuito são

$$S_r = P_r + jQ_r = V_r I_r^* \quad (3.1)$$

onde

$$I_r = \frac{V_g - V_r}{Z} \quad (3.2)$$

Portanto, tem-se que

$$S_r = V_r \frac{V_g^* - V_r^*}{Z^*} \quad (3.3)$$

ou

$$S_r = \frac{V_r V_g^*}{Z^*} - \frac{|V_r|^2}{Z^*} \quad (3.4)$$

o que implica em

$$S_r = \frac{|V_r||V_g|}{|Z|} \angle \delta + \alpha - \frac{|V_r|^2}{|Z|} \angle \alpha \quad (3.5)$$

Pode-se com isto colocar que as equações algébricas que representam este circuito em termos de potência ativa e potência reativa são

$$P_r - \frac{V_g V_r}{Z} \cos(\alpha + \delta) + \frac{V_r^2}{Z} \cos(\alpha) = 0 \quad (3.6)$$

$$Q_r - \frac{V_g V_r}{Z} \sin(\alpha + \delta) + \frac{V_r^2}{Z} \sin(\alpha) = 0 \quad (3.7)$$

As relações acima apresentam a relação de potência/tensão para a carga conectada ao circuito. Mostra-se a seguir o desenvolvimento da máxima transferência de potência para o circuito da figura 3.1 [29].

Se na equação (3.6) todas as variáveis forem mantidas constantes, com exceção de δ , tal que a potência ativa fornecida a carga, P_r , seja função somente de δ , então P_r será máxima quando $\alpha = -\delta$. Neste caso, a máxima potência ativa recebida pela carga para uma dada regulação de tensão será expressa por

$$P_{r_{\max}} = \frac{|V_r|^2}{|Z|^2} \left(\frac{|V_g|}{|V_r|} |Z| - R \right) \quad (3.8)$$

A equação (3.3) pode também ser expressa como

$$P_{r_{\max}} = \frac{|V_r||V_g|}{|Z|^2} - \frac{|V_r|^2 \cos \alpha}{|Z|} \quad (3.9)$$

Se $|V_g| = |V_r|$, então

$$P_{r_{\max}} = \frac{|V_r|^2}{|Z|} (1 - \cos \alpha) \quad (3.10)$$

ou

$$P_{r_{\max}} = \left(\frac{|V_r|}{|Z|} \right)^2 (|Z| - R) \quad (3.11)$$

e similarmente, a potência reativa fornecida para a carga é dada por

$$Q_r = -\frac{|V_r|^2}{Z} \sin \alpha \quad (3.12)$$

A figura 3.2 apresenta várias curvas da relação potência ativa -magnitude da tensão na carga [15].

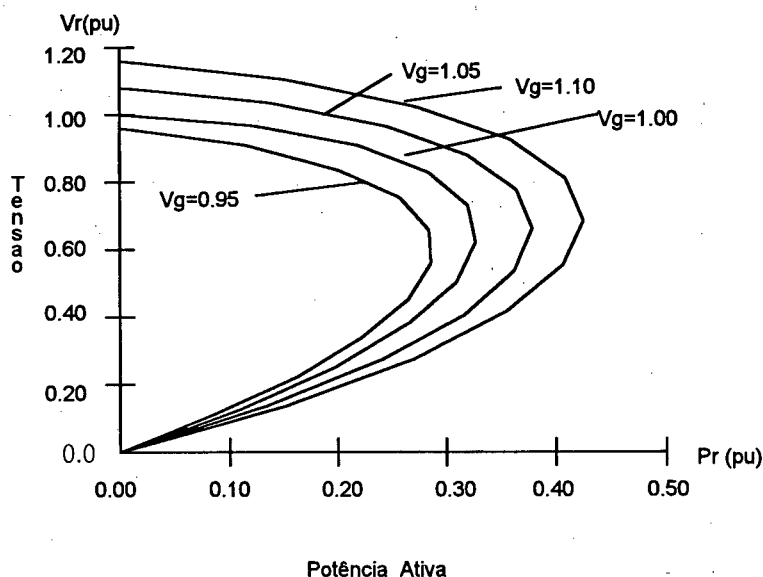


Figura 3.2 - Curva PV típica

Pode-se observar na figura 3.2 que existem sempre dois níveis de tensões para transmitir-se o mesmo valor de potência.

Embora teoricamente seja possível o sistema operar na parte inferior da curva, isto não é levado a efeito na prática, pois para se produzir a potência necessária com uma tensão com valor reduzido seriam necessários altos valores de corrente, o que não é uma situação aconselhável e nem segura para a operação de um sistema de potência. Em condições normais de operação, a queda na tensão devido a um aumento na potência da carga é compensada pelo aumento na tensão V_g do gerador.

Através da análise da figura 3.2, nota-se que se o sistema operasse na parte inferior da curva, o aumento da tensão V_g causaria uma queda adicional na tensão da carga, portanto uma situação claramente instável. Conclui-se com isto, que o sistema deve operar na parte superior da curva, ou seja, na região estável de operação [15]. Este resultado é claramente relacionado à sensibilidade tensão/potência, pois este coeficiente tende ao infinito à medida que o ponto de operação aproxima-se daquele correspondente à máxima transferência. Isto implica que o determinante da matriz Jacobiana é zero e a

solução para o fluxo de carga neste ponto não pode ser obtida. Este ponto extremo é chamado ponto de bifurcação estática do sistema [22], [32], [39], [40].

3.2 A Singularidade da Matriz Jacobiana como um Índice de Colapso de Tensão - caso simplificado

O uso da singularidade da matriz Jacobiana [18] como forma de demonstrar o mecanismo de colapso de tensão, sob o ponto de vista estático, é um tipo de abordagem atrativo, pela simplicidade das equações envolvidas e dos métodos numéricos utilizados.

Visando demonstrar a aplicação desta teoria, considere o sistema representado na figura 3.1, onde a resistência é desprezada ($r=0$) e portanto $\alpha=90^\circ$, e a tensão no gerador é fixada em $V_g = |1| \angle 0^\circ$. Com isto as equações (3.6) e (3.7) podem ser simplificadas para

$$P_r = \frac{|V_r|}{X} \sin \delta \quad (3.13)$$

$$Q_r = \frac{|V|}{X} \cos \delta - \frac{|V|^2}{X} \quad (3.14)$$

Através das equações (3.13) e (3.14) pode se traçar o contorno de P_r e Q_r no plano (V, δ) , como pode ser observado na figura 3.3.

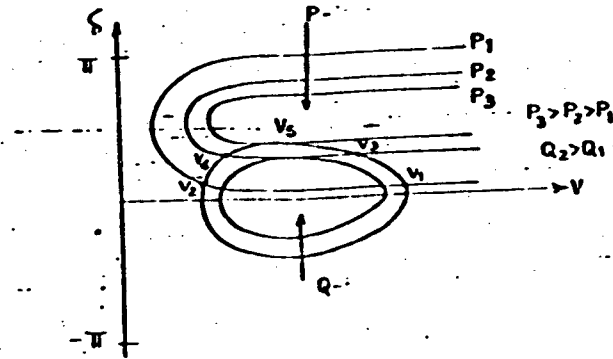


Figura 3.3 - Contorno de P_r e Q_r

A intersecção do contorno de P_r e Q_r no plano (V, δ) produz o ponto de operação de regime permanente do sistema, o qual é a solução do fluxo de potência. Nota-se ainda, que para uma carga $Q_r = Q_1$ e $P_r = P_1$, existem duas soluções de tensão, V_1 e V_2 . Variando-se a carga, e fazendo $Q_r = Q_1$ e incrementando P_1 para P_2 , V_1 diminui para V_3 e V_2 aumenta para V_4 . Além disso se P_r é aumentada para P_3 , ambas as soluções coincidem em V_5 . Neste ponto, os vetores gradientes de P_r e Q_r serão colineares, isto é

$$\nabla P_r = \alpha \nabla Q_r \quad (3.15)$$

onde α é uma quantidade escalar.

O Jacobiano do fluxo de potência para o sistema da figura 3.1, assumindo que a barra 1 é a referência, será dado por

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla P^T \\ \nabla Q^T \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

As equações (3.15) e (3.16) implicam que a matriz Jacobiana será deficiente em posto em $P_r = P_3$ e $Q_r = Q_1$, o que pode ser interpretado em termos de operação do sistema elétrico como um ponto de colapso de tensão. Neste ponto não pode

ser obtida uma solução para o fluxo de potência, e a transferência de potência terá atingido o seu valor máximo, o que caracteriza uma situação claramente instável [18].

3.3 Sistema Multimáquinas

O conceito colocado na subseção anterior pode ser estendido para grandes sistemas. Seja o sistema de potência constituído de $n+1$ máquinas e m barras de carga, sendo escolhida como referência a barra $n+m+1$. Os elementos G_{ik} e B_{ik} são componentes da matriz admitância e V_i e δ_i módulo e ângulo da tensão na carga.

Sob o ponto de vista estático, o sistema pode ser descrito pelo seguinte conjunto de equações :

$$f_i = P_i - \sum_{k=1}^n V_i V_k [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] \quad (3.17)$$

$$g_i = Q_i - \sum_{k=1}^m V_i V_k [G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k)] \quad (3.18)$$

sendo P_i e Q_i as injeções de potência ativa e reativa, respectivamente, na barra i .

Através do Método da Continuação, cujo detalhe pode ser encontrado na referência [15], é possível estender os conceitos fundamentais utilizados no caso de duas barras para sistemas multimáquinas.

As equações (3.17) e (3.18) podem ser expressas com o auxílio de um vetor compacto da forma

$$\underline{f}(\underline{x}, \underline{p}) = \underline{0} \quad (3.19)$$

onde :

$$\underline{f} = [f_1, \dots, f_{m+n}, g_1, \dots, g_{m+n}]^T : \mathbb{R}^{4(m+n)} \rightarrow \mathbb{R}^{2(m+n)} \quad (3.20)$$

$$\underline{x} = [\delta_1, \dots, \delta_{m+n}, V_1, \dots, V_{m+n}]^T \in \mathbb{R}^{2(m+n)} \quad (3.21)$$

$$\underline{p} = [P_1, \dots, P_{m+n}, Q_1, \dots, Q_{m+n}]^T \in \mathbb{R}^{2(m+n)} \quad (3.22)$$

são vetores função, estado e parâmetros, respectivamente.

A determinação do lugar das raízes da equação (3.19) para um vetor de parâmetros específicos, é realizada determinando-se a derivada total das funções não lineares ao longo da sua trajetória, tal que

$$df(\underline{x}, \underline{p}) = 0 \quad (3.23)$$

Considerando-se \underline{x} e \underline{p} parametrizados por um escalar t , a equação (3.23) pode ser colocada na forma

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \underline{x}} \right) \left(\frac{d\underline{x}}{dt} \right) = - \left(\frac{\partial f}{\partial \underline{p}} \right) \left(\frac{d\underline{p}}{dt} \right) \quad (3.24)$$

A resolução da equação (3.24) implica a obtenção de uma solução do tipo $(\underline{x}^*, \underline{p}^*)$ tal que, $f(\underline{x}, \underline{p}) \Big|_{(\underline{x}^*, \underline{p}^*)} = 0$ e da definição da trajetória do vetor \underline{p} parametrizada com o escalar t .

As equações (3.17) e (3.18) dão origem à equação (3.19), cuja primeira derivada em relação aos elementos do vetor \underline{p} fornece

$$\frac{\partial f}{\partial \underline{p}} = \left[\frac{\partial}{\partial P} (P - P(V, \delta)), \frac{\partial}{\partial Q} (Q - Q(V, \delta)) \right] \quad (3.25)$$

ou, em forma simplificada

$$\underline{f}_p(\underline{x}, \underline{p}) = \underline{I} \quad (3.26)$$

onde \underline{I} é a matriz identidade de ordem $2(m+n) \times 2(m+n)$ e $\underline{f}_p = \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{p}}$. Isto permite reescrever a equação (3.24) na forma

$$\underline{f}_x \left(\frac{d\underline{x}}{dt} \right) = - \left(\frac{d\underline{p}}{dt} \right) \quad (3.27)$$

onde $\underline{f}_x = \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{x}}$, é a matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional via método de Newton-Raphson.

Considerando-se que $\left(\frac{d\underline{x}}{dt} \right)$ é diferente de zero para uma especificada

condição de operação, e sabendo que $\frac{dP_i}{dV_i} = 0$ no ponto de bifurcação, então a condição

para que este ponto ocorra é que a matriz \underline{f}_x seja singular. A equação (3.27) caracteriza então a forma básica de representação do limite de estabilidade em regime permanente para um sistema multimáquinas, e portanto, o ponto de colapso de tensão.

3.4 Modelagem dos Componentes

Em estudos de estabilidade de tensão deve ser dada atenção especial aos modelos dos componentes do sistema de potência, pois caso suas modelagens apresentem deficiências, os resultados obtidos apresentarão distorções nos seus valores, não

representando a realidade do fenômeno. Neste trabalho são apresentados os modelos dos componentes para estudo segundo a abordagem estática.

3.4.1 Geradores, Sistema de Transmissão e Elementos Shunt

Em estudos de fluxo de potência os geradores são representados através de injeção de potência ativa e reativa no sistema, através de barras do tipo PV. Nos estudos de estabilidade de tensão é de vital importância que sejam representados os limites de potência ativa e reativa, para que a potência fornecida não afete a exatidão dos resultados.

A transferência de energia ao longo do sistema de potência é realizada através das linhas de transmissão e transformadores. Em estudos da rede elétrica em regime permanente, as linhas de transmissão são modeladas através do circuito Π equivalente. Os transformadores são representados através do modelo Π de transformadores, com tap fixo e com tap variável sob carga (LTC).

Os elementos shunt de compensação reativa, isto é, capacitores e reatores de controle de tensão, são modelados como uma admitância e incluídos na matriz admitância de barras do sistema.

3.4.2 Carga

O grau de precisão com que a carga é modelada em estudos de estabilidade de tensão é um fator essencial para uma boa análise. Devido a este fato, a sua representação será descrita com maiores detalhes.

Dentre todos os componentes de um sistema elétrico de potência, a carga é a de determinação mais difícil. A sua modelagem apresenta uma série de dificuldades, já que ao contrário da configuração da rede, da geração e de seus controladores, a carga varia de intensidade e composição a cada segundo, representando uma larga escala de

consumidores, podendo o sistema passar por um mesmo ponto de operação, com a carga reagindo de forma distinta em função de seus componentes. Para a sua determinação têm sido adotados métodos indiretos (analíticos) e métodos diretos (testes de campo). A decisão sobre qual método utilizar é dependente da sensibilidade do analista, da precisão requerida e do tipo de estudo. Atualmente têm-se efetuado as seguintes atividades como forma obter um modelo de carga confiável:

- Reprodução de uma ocorrência registrada, ajustando-se o modelo de carga até se verificar se as condições de tensão e frequência;
- Execução de testes em diversas subestações de forma a se traduzir os resultados para a formulação polinomial ou exponencial;
- Levantamento das características das cargas por classe de consumidores a partir de seus componentes;
- Utilização simultânea dos métodos anteriores.

A tendência atual é proceder a determinação das características de carga pela agregação dos componentes individualizados, de forma a se obter o modelo de carga em uma determinada barra.

A composição da carga em termos de consumidores costuma ser dividida em três classes: industrial, residencial e comercial, sendo algumas vezes, em determinadas regiões, classificado um quarto tipo, o consumidor rural, importante devido ao alto consumo sazonal (irrigação, secagem, etc.).

Em estudos de estabilidade de tensão a carga tem papel fundamental [2],[17],[23],[26],[27],[37],[41], sendo decisiva sua correta modelagem na análise do

fenômeno colapso de tensão. O assunto sobre modelagem de carga ganhou um novo impulso, estando atualmente em desenvolvimento várias pesquisas para determinar modelos adequados para este tipo de estudo, tanto sob o aspecto estático como dinâmico [2], [26], [27], [41] . Apresentam-se a seguir, algumas definições úteis para o estudo de modelagem de carga.

- **Característica de Carga :** É um conjunto de parâmetros, tal como fator de potência, variação de P e Q, etc., que caracterizam o comportamento de uma carga específica. Este termo pode ser aplicado para um dispositivo de carga, uma componente de carga, uma classe de carga ou carga total da barra.

- **Modelo de Carga :** É a representação matemática da relação entre a tensão de barra (magnitude e frequência) e a potência (ativa ou reativa) ou corrente na barra de carga.

- **Modelo Estático de Carga :** É o modelo que expressa a potência ativa e reativa em um determinado instante de tempo como função da magnitude da tensão e da frequência de uma barra, para o mesmo instante. Os modelos estáticos de carga são usados essencialmente para representar componentes estáticos da carga, isto é, resistência e cargas de iluminação, e como uma aproximação para componentes dinâmicos, por exemplo, cargas acionadas por motores.

- **Modelo Dinâmico de Carga :** É o modelo que expressa a potência ativa e reativa em um instante de tempo como função da magnitude de tensão e frequência em um instante passado de tempo, e usualmente, incluindo o instante presente. Equações diferenciais podem ser usadas para representar tais modelos.

Modelar analiticamente cada barra com a sua respectiva carga é uma tarefa complicada, razão pela qual adota-se uma modelagem de carga característica por áreas, a qual é apresentada a seguir.

3.4.2.1 Tipos de Representação de Cargas

Os três tipos de representação de cargas estáticas utilizadas para estudos de fluxo de potência e estabilidade são:

- **Potência Constante** : Neste modelo, potência ativa (MW) e a potência reativa (Mvar) são mantidas constantes durante todo o processo de cálculo do fluxo de potência. Apesar de simplificar razoavelmente a solução do problema, este tipo de modelagem é o mais crítico, pois sendo geralmente a magnitude da tensão uma variável explícita nas equações da rede, a manutenção da injeção de potência constante é implicitamente garantida pela injeção de corrente na barra, o que não reflete com precisão o que acontece na prática. Por esta razão este modelo é classificado como " pessimista " em relação ao real comportamento da carga.

- **Corrente constante** : Nesta representação, tem-se que

$$P + jQ = V I^* \quad (3.28)$$

portanto, como a carga é do tipo corrente constante, I é calculado como

$$I = \frac{P - jQ}{V^*} = |I|(\theta - \phi) \quad (3.29)$$

sendo que $|I|$ deve ser mantido constante, logo, P e Q são proporcionais a $|V|$.

- **Impedância Constante** : Esta é a representação freqüentemente usada quando existem muitas cargas dependentes da tensão. Se as cargas ativa (MW) e reativa (Mvar) são assumidas como conhecidas, para a impedância permanecer constante, deve-se ter

$$P + jQ = VI^* = V \frac{V^*}{Z^*} = \frac{|V|^2}{Z^*} \quad (3.30)$$

o que implica em

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{|V|^2}{P - jQ} \quad (3.31)$$

ou, em termos de admitância

$$Y = \frac{I}{V} = \frac{P - jQ}{|V|^2} \quad (3.32)$$

Esta representação é dita " otimista ", pois a potência da carga diminui com o quadrado da queda de tensão.

Em situações reais a carga é composta por parcelas de cada uma das representações apresentadas. Quase todas as cargas podem ser representadas por combinações de impedância constante, corrente constante ou potência constante. Para representar este tipo de efeito foi desenvolvida uma modelagem chamada **forma polinomial** [1],[2],[43]. Neste tipo de modelagem, as demandas de potência ativa e reativa de uma barra são analiticamente expressas como

$$P = P_0 \left[a_p + b_p \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (3.33)$$

$$Q = Q_0 \left[a_q + b_q \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (3.34)$$

Os parâmetros deste modelo são os coeficientes (a_p, b_p, c_p, a_q, b_q e c_q) e o fator de potência da carga. Se este modelo é usado para representar dispositivos de cargas específicos, V_0 pode ser a razão de tensão do dispositivo, e P_0 e Q_0 podem ser a potência consumida na taxa de tensão. Contudo, quando estes modelos são usados para representar uma barra de carga, V_0, P_0 e Q_0 são normalmente tomados como os valores correspondentes a condição inicial de operação do sistema.

A título de exemplo colocam-se abaixo algumas representações típicas do sistema elétrico brasileiro[41], usadas pelas concessionárias em estudo de fluxo de potência e estabilidade.

Área	Zc		Sc	
	P(%)	Q(%)	P(%)	Q(%)
Furnas	75	100	25	-
Eletropaulo	50	100	50	-
Light	50	100	50	-
CESP	75	100	25	-
Copel	75	100	25	-
Eletrosul	75	100	25	-
CEEE	75	100	25	-

Figura 3.4 - Representação típica do Sistema Elétrico Brasileiro

onde : Z_c - Impedância constante

S_c - Potência constante

Nenhuma concessionária do sistema elétrico brasileiro adota a representação de corrente constante (I_c) em sua área de atuação.

Outra forma de representação do modelo de carga é a **forma exponencial** [1],[2],[36],[43]. Para este modelo as equações são

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} \quad (3.35)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq} \quad (3.36)$$

Dois ou mais termos com expoentes diferentes são algumas vezes incluídos em cada equação. Os parâmetros deste modelo são os expoentes, np e nq , e o fator de potência da carga. Os valores dos expoentes podem ser 0, 1 ou 2, sendo a escolha feita para representar a carga como potência constante, corrente constante ou impedância constante, respectivamente. Outros expoentes podem ser usados para representar o efeito da agregação de diferentes tipos de componentes de carga. Expoentes maior que 2 ou menor que 0 podem ser apropriados para alguns tipos de carga.

3.5 Conclusão

Para o entendimento do mecanismo do colapso de tensão é necessário que alguns conceitos básicos de sistemas de potência sejam bem esclarecidos. Neste trabalho utilizou-se o sistema do tipo máquina-barra infinita como um exemplo apropriado para o estudo sobre limite de potência transmitida em um circuito, e para estudar o comportamento das curvas de relação potência-tensão na carga. Este mesmo sistema foi usado para determinar matematicamente o ponto de colapso de tensão, através do uso da singularidade da matriz Jacobiana [18], sendo que o conceito de singularidade pode ser estendido para um sistema multimáquinas, usando o Método da Continuação [15] para demonstrar que, no ponto onde o sistema de equações do fluxo de potência não possuem solução, a matriz Jacobiana é singular. Observou-se nas seções 3.2 e 3.3 que o uso do mínimo valor singular para determinar a singularidade do sistema é adequado, o que tem sido feito em vários trabalhos, sendo considerado um índice efetivo e confiável para determinação da singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de potência [14],[15],[16],[17],[18].

A correta modelagem dos elementos componentes de um sistema de potência é fundamental no processo de instabilidade de tensão. Descrevem-se os modelos de geradores, linhas de transmissão, transformadores e elementos shunt para estudos de fluxo de potência. Observa-se ainda que a carga possui papel fundamental no fenômeno de colapso de tensão, portanto é descrita com maiores detalhes, sendo que seu comportamento estático tem sido objeto de discussão em vários trabalhos da literatura [1],[2],[36],[43].

No próximo capítulo será descrita a metodologia proposta para o estudo da estabilidade estática de tensão.

Capítulo 4

Metodologia Proposta

Apresenta-se neste capítulo, a aplicação da técnica de Decomposição em Valores Singulares (SVD - Singular Value Decomposition) ao problema de colapso de tensão. Inicialmente é mostrada a decomposição da matriz Jacobiana associada ao método de Newton-Raphson convencional de solução de fluxo de potência. Segue-se a análise de duas matrizes derivadas da matriz Jacobiana, as quais são usadas para a determinação de um índice de colapso de tensão. Descreve-se também o algoritmo para o cálculo do fluxo de potência, chamado Newton-Raphson com fator de amortecimento, usado para estudar o sistema em torno do seu ponto de divergência. Encerra-se o capítulo, apresentando-se uma abordagem baseada nas relações de sensibilidade entre as variáveis do sistema de potência para análise das potências das barras sujeitas a instabilidade de tensão.

4.1 Decomposição em Valores Singulares

A decomposição de matrizes em valores singulares é uma técnica matemática antiga. Em 1889 Sylvester estabeleceu esta técnica para matrizes reais e quadradas [30], e em 1939 Eckart e Young estenderam a técnica para matrizes gerais [30]. Uma visão completa das propriedades dos valores singulares foi apresentada por Gohberg e Krein em 1969 [30]. Aplicações mais recentes de valores singulares são propostas por Golub [31].

A aplicação desse tipo de algoritmo ao problema de colapso de tensão em sistemas de potência foi proposta por Thomas e Tiranuchit [15], tendo a mesma servido de referência a outros trabalhos nesta linha [16],[17],[18]. A seguir, apresenta-se a aplicação da Decomposição em Valores Singulares no contexto do presente trabalho.

4.1.1 Aplicação

Para apresentar a técnica de decomposição de uma matriz em valores singulares com a correspondente interpretação do mínimo destes valores, deve-se considerar o seguinte problema básico: dada uma matriz, determinar as condições de perturbação na matriz \underline{A} tal que $(A + \Delta A)$ é singular. A noção da singularidade da matriz $(A + \Delta A)$ está fortemente relacionada à dificuldade de se calcular a sua inversa. Se a matriz A é não singular, pode-se escrever

$$(A + \Delta A)^{-1} = (I + A^{-1} \Delta A)^{-1} A^{-1} \quad (4.1)$$

É possível mostrar [30][31] que o termo $(I + A^{-1} \Delta A)$ tem uma inversa se

$$\|A^{-1} \Delta A\| < 1 \quad (4.2)$$

onde $\|X\|$ representa a norma matricial de X .

Desde que

$$\|A^{-1}\Delta A\| \leq \|A^{-1}\| \|\Delta A\| \quad (4.3)$$

a condição imposta pela equação (4.2) é satisfeita se

$$\|\Delta A\| \leq \frac{1}{\|A^{-1}\|} \quad (4.4)$$

O escalar $\|A^{-1}\|$ representa portanto, uma medida da proximidade da matriz A da singularidade.

Quanto ao tipo de norma matricial a ser selecionado, apesar de que existem várias possibilidades, a norma quadrática expressa como

$$\|A\|^2 = \lambda_{\max}(A^T A) = \sigma_{\max}^2(A) \quad (4.5)$$

onde $\lambda_{\max}(A^T A)$ é o máximo autovalor da matriz simétrica $(A^T A)$ e $\sigma_{\max}(A)$ é o maior valor singular de A , é a recomendada [15],[30],[31]. Desde que $\lambda_{\max} = \sigma_{\max}^2$, em termos de valores singulares pode-se escrever

$$\|A^{-1}\| = \sigma_{\max}(A^{-1}) \quad (4.6)$$

Entretanto, se a decomposição em valor singular é dada por

$$A = U \Sigma V^T \quad (4.7)$$

onde, U e V são matrizes ortogonais, isto é, $(UU^T = U^T U = I$ e $VV^T = V^T V = I)$ sendo I a matriz identidade e $\Sigma = \text{diag} [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n]$, ou seja, Σ é uma matriz diagonal com $\sigma_{\max} = \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n = \sigma_{\min} \geq 0$ então

$$A^{-1} = V \Sigma^{-1} U^T \quad (4.8)$$

e

$$\|A^{-1}\|^{-1} = \sigma_{\min} \quad (4.9)$$

onde σ_{\min} é o menor valor singular de A .

Se a matriz A é quadrada, real e de ordem n , então a Decomposição em Valores Singulares representada na equação (4.7) pode ser reescrita como

$$A = U \Sigma V^T = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^T \quad (4.10)$$

os vetores singulares de ordem n u_i e v_i são colunas das matrizes U e V , respectivamente, e σ_i , $i=1, n$ são os elementos da matriz diagonal Σ com $\sigma > 0$ para todo i .

Para uma matriz simétrica real os valores absolutos dos autovalores de uma decomposição de autovalores são idênticos aos valores singulares da mesma matriz.

Para aplicação desta teoria no problema de sistemas de potência em questão, uma relação de linearidade entre as potências ativa e reativa nas barras e as magnitudes de tensão e ângulo deve ser encontrada. Pela facilidade com que pode ser calculada, e pelas informações nela contida, a matriz Jacobiana do fluxo de potência via Newton-Raphson pode ser vista como uma primeira alternativa de representação dessas relações. Assim, tomando a forma linearizada das equações da rede elétrica,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

ou

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

onde J é a matriz Jacobiana e suas submatrizes representam as derivadas das potências ativa e reativa em relação a magnitude e ângulo da tensão nas barras, isto é,

$$H = \frac{\partial P}{\partial \theta}, N = \frac{\partial P}{\partial V}, M = \frac{\partial Q}{\partial \theta}, L = \frac{\partial Q}{\partial V}$$

A matriz J é aquela a ser decomposta em valores singulares [30], ou seja,

$$J = U \Sigma V^T \quad (4.13)$$

O mínimo valor singular, $\sigma_n(J)$, é a medida da distância da singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional. Se o mínimo valor singular é igual a zero, a matriz é singular e a solução do fluxo de potência não pode ser obtida. A singularidade da matriz Jacobiana indica que não existe uma inversa para esta matriz. Isto pode ser interpretado como uma sensibilidade infinita para a solução do fluxo de potência a pequenas perturbações nos valores dos parâmetros. No ponto onde $\sigma_n(J)=0$ muitos ramos de equilíbrio podem surgir e o estudo do sistema apresentará uma mudança qualitativa na estrutura da solução devido a pequenas mudanças nos parâmetros. Este ponto é chamado de ponto de bifurcação estática [32].

O uso do mínimo valor singular é uma técnica baseada na análise linear de sistema do tipo $Ax=b$, onde $A \in R^{n \times n}$, A é não singular, e $b \in R^n$.

Após a decomposição em valores singulares da matriz A , a solução do sistema linear pode ser escrita como

$$\mathbf{x} = A^{-1}\mathbf{b} = (U\Sigma V^T)^{-1}\mathbf{b} = \sum_{i=1}^n \frac{u_i^T \mathbf{v}_i}{\sigma_i} \mathbf{b} \quad (4.14)$$

Da equação anterior pode ser concluído que uma pequena mudança em A ou \mathbf{b} pode causar uma grande mudança em \mathbf{x} , se σ_n é bastante pequeno.

Fazendo-se a associação do mínimo valor singular, σ_n , com o último vetor singular direito, \mathbf{v}_n , e o último vetor singular esquerdo, \mathbf{u}_n , pode se calcular o efeito no vetor \mathbf{x} . No caso do sistema linear da equação (4.12), o objetivo é calcular as variações em $\mathbf{x} = [\Delta \delta^T, \Delta V^T]^T$ para uma pequena mudança nas injeções de potência ativa e reativa. Portanto, em termos analíticos a equação (4.12) se transforma em

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \mathbf{v}_n \sigma_n^{-1} \mathbf{u}_n^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

O inverso do mínimo valor singular, σ_n^{-1} , será então, sob o ponto de vista de um distúrbio, o indicador da maior modificação das variáveis de estado do sistema de potência.

Isto demonstra que o mínimo valor singular, σ_n , pode ser usado como um indicativo da proximidade de problema em relação à estabilidade de tensão em regime permanente.

É ainda possível associar os efeitos da mudança do mínimo valor singular nos vetores singulares direito, \mathbf{v}_n , e esquerdo, \mathbf{u}_n . Para isto, a equação (4.12) é expressa como

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{n1} \\ \vdots \\ v_{nn} \end{bmatrix} \sigma_n^{-1} [u_{n1}, \dots, u_{nn}]^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

ou, de outra forma,

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \sigma_n^{-1} \begin{bmatrix} v_{n1} \\ \vdots \\ v_{nn} \end{bmatrix} \left[\sum_{k=1}^{nPQ+nPV} u_{nk} \Delta P + \sum_{l=1}^{nPV} u_{nl} \Delta Q \right] \quad (4.17)$$

onde : nn representa a última posição do vetor singular direito V;

nPQ é o número de barras de carga do sistema;

nPV é o número de barras de tensão controlada do sistema;

e u_{nk} e u_{nl} são posições dos elementos do vetor singular direito U.

De acordo com o exposto acima, as seguintes observações podem ser feitas:

1. O vetor singular esquerdo, u_n , está associado às variações de potência ativa e reativa do sistema, e indica qual destas variações têm maior efeito nas barras susceptíveis ao colapso;
2. O vetor singular direito, v_n , indica quais variáveis, δ ou V , tem maior influência nas barras susceptíveis ao colapso de tensão;
3. O mínimo valor singular está mais fortemente acoplado ao vetor singular direito, v_n , isto implica que sua variação está altamente relacionada com as variáveis δ e V , indicando desta forma a proximidade do colapso de tensão.

Pode-se concluir, portanto, que a decomposição em valores singulares através do mínimo valor singular, σ_n , e dos vetores esquerdo, u_n , e direito, v_n , fornecem informações bastantes úteis para a análise do comportamento do sistema em relação a problemas de estabilidade de tensão.

4.1.2 Matrizes Derivadas da Jacobiana

Várias são as matrizes envolvidas em estudos de redes elétricas que podem ser decompostas na forma mostrada na equação (4.13).

A matriz Jacobiana, por exemplo, é formada de quatro submatrizes (equação 4.12) que fornecem informações importantes sobre o comportamento do sistema sob o ponto de vista estático. A decomposição em valores singulares pode ser aplicada a qualquer dessas submatrizes ou a uma combinação das mesmas.

A seguir apresentam-se duas matrizes derivadas da matriz Jacobiana, as quais servem para o estudo de colapso de tensão a partir da análise do mínimo valor singular .

4.1.2.1 Matriz G

Para a determinação desta matriz, deve-se fazer algumas considerações operativas sobre o sistema, de maneira que seu uso possa ser validado.

Supondo que na equação 4.12 os incrementos de potência ativa são nulos, isto é, $\Delta P = 0$, pode-se reescrever esta equação como

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Isto fornece as equações

$$0 = H \Delta\delta + N \Delta V \quad (4.19)$$

$$\Delta Q = M \Delta\delta + L \Delta V \quad (4.20)$$

Isolando-se $\Delta\delta$ na equação (4.19) obtém-se

$$-H^{-1}N\Delta V = \Delta\delta \quad (4.21)$$

Da substituição da equação (4.21) na equação (4.20) resulta

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = L - MH^{-1}N \quad (4.22)$$

ou, alternativamente,

$$L - MH^{-1}N = G \quad (4.23)$$

Observa-se portanto, que os elementos da matriz G fornecem uma medida de sensibilidade entre as variações de potência reativa e magnitude de tensão, e são obtidos explorando-se o desacoplamento entre as malhas $P\delta$ e QV . Considerando que os maiores desvios de tensão são devidos a problemas de potência reativa e não de potência ativa, esta matriz pode ser vista como potencialmente capaz de fornecer subsídios para o estudo do problema de estabilidade de tensão.

Assumindo-se adicionalmente que o sistema não possui problemas de estabilidade em regime permanente (problema angular), o determinante da submatriz H

será diferente de zero ($\det H \neq 0$), o que permite o uso da fórmula de Schur[30]. Para calcular o determinante da matriz Jacobiana do fluxo de potência, isto é

$$\det J = \det H \cdot \det G \quad (4.24)$$

onde a submatriz G é definida na equação (4.23)

Portanto, se $\det H \neq 0$, a matriz J será singular se e somente se a matriz G for singular. Pode-se, então, associar a matriz G à matriz J , obtendo-se desta forma um índice para indicação de problemas de tensão em regime permanente.

4.1.2.2 Matriz G_v

Outra matriz também utilizada na análise de problemas de colapso de tensão é a matriz G_v , obtida com base no desacoplamento existente entre os ângulos e as magnitudes das tensões para um sistema de potência com nível de tensão elevado.

Neste caso, assumindo-se que o sistema é completamente desacoplado, ou seja, que a variação de potência ativa é zero, ($\Delta P = 0$), bem como a variação dos ângulos das tensões, ($\Delta \delta = 0$), a equação (4.12), se transforma em

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

tal que o rearranjo desta equação fornece

$$\Delta Q = G_v \Delta V = L \Delta V \quad (4.26)$$

onde pode ser observado que a matriz G_v , é a própria submatriz L , que relaciona a variação da potência reativa à variação de tensão $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$.

Nesta seção foi apresentada a técnica de Decomposição em Valores Singulares. Na próxima seção é apresentado o método de Newton-Raphson com amortecimento, usado para obter a solução do fluxo de potência e a matriz Jacobiana quando o sistema encontra-se operando próximo do ponto de singularidade.

4.2 Método de Newton-Raphson com Fator de Amortecimento

Muitos programas para cálculo de fluxo de potência usam o Método de Newton-Raphson [29],[33] ou modificações (p. ex. Desacoplado Rápido [34]). Normalmente estes métodos convergem rapidamente para a solução desejada. Entretanto, a não convergência dentro de um número especificado de iterações pode ocorrer. Para melhorar a convergência, várias modificações do método básico têm sido usadas [34],[33], bem como melhores estimativas iniciais [9].

O método de Newton Raphson com amortecimento [35] foi desenvolvido visando assegurar que, caso o processo iterativo tendesse à divergência, o algoritmo faria com que a sequência de pontos calculados se aproximasse o mais possível da solução, de maneira a chegar no limite onde o método de Newton Raphson começasse a divergir. Isto permitiu que se estudasse o comportamento do sistema em torno do ponto de divergência do fluxo de potência convencional.

4.2.1 Desenvolvimento Teórico

Para estabelecer os fundamentos do método de Newton-Raphson com amortecimento, seja o seguinte conjunto de equações algébricas não lineares,

$$G(\mathbf{x}^i) = \begin{pmatrix} g_1(\mathbf{x}^i) \\ \vdots \\ g_n(\mathbf{x}^i) \end{pmatrix} = \underline{0} \quad (4.27)$$

onde o superescrito i representa a iteração corrente.

O método de Newton-Raphson consiste na obtenção da solução (\mathbf{x}^s) do sistema, a partir de um conjunto de estimativas iniciais $\mathbf{X}^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$. A fim de obtermos a solução (\mathbf{x}^s), o seguinte sistema de equações lineares é utilizado para calcular os incrementos $\Delta \mathbf{x}^i$,

$$\frac{\partial G}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}^i) \Delta \mathbf{x}^i = -G(\mathbf{x}^i) \quad (4.28)$$

No método de Newton Raphson tradicional, a atualização da variável \mathbf{x}^i é obtida resolvendo-se um sistema linear para o vetor $\Delta \mathbf{x}^i$ a cada iteração i . No método de Newton-Raphson com amortecimento é introduzido um fator de amortecimento λ no valor das componentes do vetor $\Delta \mathbf{x}^i$, desta maneira o vetor \mathbf{x} na iteração $i+1$ é dado por

$$\mathbf{x}^{i+1} = \mathbf{x}^i + \lambda^i \Delta \mathbf{x}^i. \quad (4.29)$$

onde λ^i é um escalar que satisfaz a condição $0 \leq \lambda^i \leq 1$.

Com o objetivo de retardar o processo iterativo e evitar a divergência do mesmo, o algoritmo de Newton-Raphson com amortecimento necessita que a cada iteração seja determinado um fator de amortecimento λ_{\min} ótimo, com o qual se obtém uma aproximação mais segura da vizinhança do ponto onde o processo iterativo eventualmente diverge.

O fator de amortecimento λ é obtido através da minimização de uma função quadrática $\Phi(\lambda)$ expressa em função dos resíduos de potência calculados a cada iteração na solução corrente x^i .

O problema da minimização unidimensional correspondente à determinação de λ é analiticamente expresso como

$$\text{Minimizar } f(\lambda) = [g_1^2(x^{i-1} + \lambda \Delta x^i) + \dots + g_n^2(x^{i-1} + \lambda \Delta x^i)] \quad (4.30)$$

sujeito a $0 \leq \lambda \leq 1.0$

onde $g_j(x)$ é o j -ésimo componente do vetor $G(x)$ da equação (4.27).

Neste problema, três situações podem ser observadas :

1. Se $\lambda = 0$, o vetor x^{i-1} não é atualizado, isto é, $x^i = x^{i-1}$;
2. Se $\lambda = 1$, a correção em x^{i-1} é a mesma do método de Newton-Raphson convencional;
3. Se $0 < \lambda < 1$, apenas uma parcela do incremento Δx^i é atualizada na correção.

Deve ser observado que, no caso de fluxos de potência convergentes, o efeito de λ é apenas retardar a convergência. Porém nos casos em que isto não ocorre, a aplicação adequada do fator λ evita a divergência.

A solução deste problema de otimização é obtida aproximando-se a função dos resíduos $f(\lambda)$, por uma quadrática $\Phi(\lambda)$ ao longo da direção $\lambda\Delta x^i$ e calculando o valor de λ que minimiza esta função. Isto pode ser sumarizado em dois passos básicos:

- 1 - Determinar três valores de $\Phi(\lambda)$ (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) correspondentes aos pontos $\lambda_1 = -\Delta\lambda$, $\lambda_2 = 0$ e $\lambda_3 = \Delta\lambda$.

Conforme indicado na figura 4.1, a função quadrática aproximada é expressa como

$$\Phi(\lambda) = \phi_2 - \frac{(\phi_1 - \phi_2)}{2\Delta\lambda}\lambda + \frac{(\phi_1 - 2\phi_2 + \phi_3)}{2(\Delta\lambda)^2}\lambda^2 \quad (4.31)$$

onde

$$\phi_j = f(x^i + \lambda_j \Delta x^i) \quad (4.32)$$

- 2 - Determinar λ_{\min} tal que $\Phi(\lambda)$ é minimizada. Para isto deriva-se $\Phi(\lambda)$ em relação a λ e iguala-se o resultado a zero, isto é, $\frac{d\Phi}{d\lambda} = 0$. Isto fornece

$$\lambda_{\min} = \frac{\Delta\lambda(\phi_1 - \phi_3)}{2\phi_1 - 4\phi_2 + 2\phi_3} \quad (4.33)$$

Este procedimento fornece o ponto de mínimo da função $\Phi(\lambda)$ sem a necessidade do cálculo da derivada da função original, ou seja, baseado apenas na aproximação por uma quadrática que passa por três pontos.

A figura 4.1 demonstra graficamente o cálculo de λ_{\min}

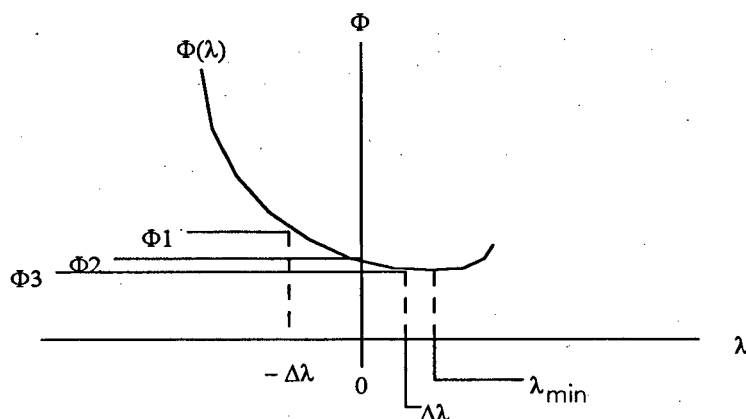


Figura 4.1 - Gráfico da função quadrática (Φ)

Após o cálculo de λ_{\min} elimina-se o ponto onde a função possui maior valor e calcula-se novamente valor do ponto de mínimo, tomando novamente três pontos. Repete-se o processo até que seja atingida uma tolerância, sendo o último ponto obtido o ponto de mínimo da função nesta iteração.

As seguintes considerações devem ser feitas sobre $\Delta\lambda$:

- Se $\Delta\lambda$ é pequeno demais surgem erros de arredondamento em ϕ_1 e ϕ_3 ;
- Se $\Delta\lambda$ é grande demais a parábola deixa de pertencer à vizinhança de x^i ;

Para assegurar um valor adequado a $\Delta\lambda$, ϕ_1 e ϕ_3 da equação (4.32) são calculados em torno de x^i , tal que

$$d^i = \lambda_3 \|\Delta x^i\| = \Delta\lambda \|\Delta x^i\| \quad (4.34)$$

onde : d^i é uma fração especificada da prévia correção Δx^{i-1} .

Sendo

$$d^i = \alpha D^{i-1} \quad (4.35)$$

onde

$$D^{i-1} = \|x^i - x^{i-1}\| = \lambda_{\min}^{i-1} \|\Delta x^{i-1}\| \quad (4.36)$$

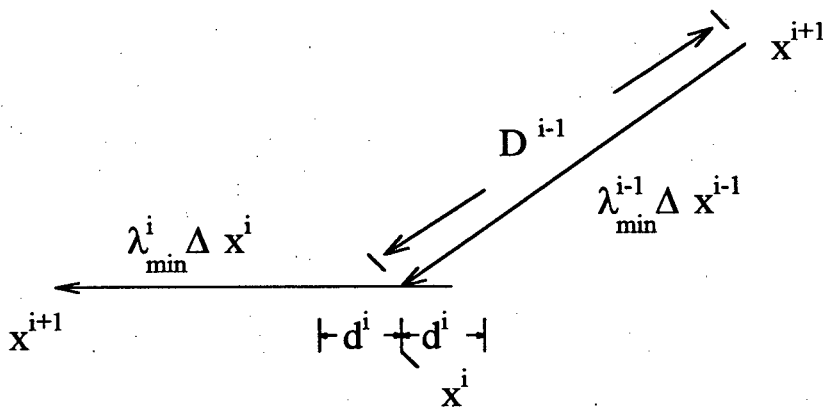


Figura 4.2 - Gráfico para determinação da correção do intervalo de $\Delta\lambda$

Contudo, das equações (4.34) e (4.35) tem-se que

$$\alpha D^{i-1} = \Delta\lambda \|\Delta x^i\| \quad (4.37)$$

a qual, resolvida para $\Delta\lambda$, resulta

$$\Delta\lambda = \alpha \lambda_{\min}^{i-1} \frac{\|\Delta x^{i-1}\|}{\|\Delta x^i\|} \quad (4.38)$$

onde α representa o tamanho dos intervalos iniciais $\Delta\lambda$, sendo 0,25 o valor aconselhável para a estimativa inicial de α .

Apresentou-se nesta seção o desenvolvimento matemático do método de Newton amortecido. Na próxima seção será apresentada a matriz sensibilidade, derivada da matriz Jacobiana obtida a partir do método de Newton.

4.3 O Uso das Relações de Sensibilidade

O estudo da sensibilidade [33] das variáveis de um sistema de potência em relação a um certo conjunto de ações de controle é importante na determinação de ações de controle a nível de operação, pois facilitam a tomada de decisão do despachante quanto ao controle mais efetivo para uma certa contingência, e a nível de planejamento permitem uma elaboração de uma estratégia de operação mais eficiente, como por exemplo, a melhor localização da compensação reativa.

Neste trabalho, a sensibilidade foi utilizada como uma ferramenta auxiliar na identificação das variáveis de maior influência nas barras suscetíveis ao colapso de tensão.

4.3.1 Desenvolvimento

Dada uma solução inicial $g(x^0, u^0) = 0$, a expansão em série de Taylor na vizinhança do ponto (x^0, u^0) e na direção dos vetores $(\Delta x, \Delta u)$ incluindo o termo de primeira ordem fornece

$$g(x^0 + \Delta x, u^0 + \Delta u) = g(x^0, u^0) + \left. \frac{\partial g^T(x, u)}{\partial x} \right|_{(x^0, u^0)} \Delta x + \left. \frac{\partial g^T(x, u)}{\partial u} \right|_{(x^0, u^0)} \Delta u \quad (4.39)$$

Desde que as equações do balanço de potência devem ser satisfeitas no novo ponto de operação, isto é, $g(x^0 + \Delta x, u^0 + \Delta u) = 0$, obtém-se a seguinte relação

$$\left. \frac{\partial g^T(x, u)}{\partial x} \right|_{(x^0, u^0)} \Delta x + \left. \frac{\partial g^T(x, u)}{\partial u} \right|_{(x^0, u^0)} \Delta u = 0 \quad (4.40)$$

de onde resulta a equação

$$\Delta x = - \left[\left. \frac{\partial g^T(x^0, u^0)}{\partial x} \right] \right]^{-1} \cdot \left[\left. \frac{\partial g^T(x^0, u^0)}{\partial u} \right] \right] \Delta u \quad (4.41)$$

ou, na forma compacta,

$$\Delta x = J_{fp}^{-1} \cdot S_{su} \cdot \Delta u \quad (4.42)$$

onde Δx é o vetor de incrementos nas variáveis dependentes, podendo ser solucionado como $[\Delta \delta_{PV}^T \ \Delta \delta_{PQ}^T \ \Delta V_{PQ}^T]$, sendo $\Delta \delta_{PV}$ e $\Delta \delta_{PQ}$ os vetores de incrementos nos ângulos das tensões das barras PV e PQ respectivamente, e ΔV_{pq} o vetor de incrementos correspondentes as magnitudes de tensão das barras de carga; J_{fp} é a matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional, e S_{su} representa a relação de sensibilidade entre as variações das injeções de potência das barras PV e PQ com as variações das variáveis de controle u .

4.4 Conclusão

Neste capítulo foi inicialmente apresentada a técnica de Decomposição em Valores Singulares. Esta técnica tem sido discutida e analisada em muitos trabalhos na literatura [14],[15],[16],[17],[18],[23]. Neste trabalho, esta técnica foi utilizada para determinar o mínimo valor singular a fim de utilizá-lo como um índice de colapso de tensão. Foi analisado o mínimo valor singular de quatro matrizes, apresentadas na seção 4.1, as quais possibilitam fazer uma análise da evolução do colapso de tensão. Foi também analisado o uso dos vetores singulares esquerdo e direito, como meio de obter-se uma indicação de quais áreas e barras são mais sujeitas ao colapso de tensão, e quais de suas variáveis são mais sensíveis.

A seguir, foi apresentado o método de Newton-Raphson com amortecimento [35], usado para o cálculo do fluxo de potência quando o sistema encontra-se operando próximo do ponto de colapso de tensão, situação em que os métodos convencionais de cálculo do fluxo de potência não apresentam solução. Em situações onde o sistema esteja operando em um ponto satisfatório, este método comporta-se como o método de Newton-Raphson convencional, porém executa algumas iterações a mais até obter a convergência.

Por último, foram apresentadas as relações de sensibilidade, que serviram para selecionar os controles mais sensíveis das barras sujeitas ao colapso de tensão.

No próximo capítulo serão apresentadas a análise e os resultados numéricos dos algoritmos propostos neste capítulo.

Capítulo 5

Resultados Numéricos

Apresentam-se neste capítulo os resultados numéricos obtidos à partir da aplicação da técnica de Decomposição em Valores Singulares proposta neste trabalho.

As simulações foram efetuadas em dois sistemas com características e dimensões diferentes. O primeiro é o sistema teste IEEE-30 barras, enquanto o segundo é um subsistema de 96 barras, da CEEE-RS, o qual representa a região Oeste do Rio Grande do Sul.

5.1 Introdução

A seguir são apresentados os resultados das simulações do sistema teste IEEE30 e do sistema real CEEE-RS Oeste. Estes dois sistemas foram usados para validar o método estudado, sendo o sistema IEEE30 [A2] escolhido devido a seu constante uso na literatura, o que permite a comparação de resultados obtidos neste trabalho. A escolha do sistema CEEE-RS Oeste [A3] é devida ao fato deste sistema apresentar problemas críticos de tensão e suporte de reativos. Outra razão desta escolha é a experiência do autor na operação deste sistema, tendo o mesmo realizado estudos de comportamento dinâmico e de

implantação de esquemas de subtensão para controle da segurança da operação desta região [47], [48].

Os resultados obtidos da simulação destes sistemas são colocados sob a forma de gráficos e tabelas com o objetivo de tornar clara a evolução do colapso de tensão. As rotinas computacionais foram desenvolvidas em Fortran Lahey [45], que permite o gerenciamento da memória para grandes matrizes. A rotina para cálculo da Decomposição em Valores Singulares foi obtida da Biblioteca Linpack [44]. Algumas das rotinas usadas no programa fazem parte de uma biblioteca desenvolvida no Laboratório de Sistemas de Potência da UFSC (Labspot), as quais foram usadas com sucesso neste trabalho. Os casos base adotados foram validados através do programa BIGPOWER [46], o qual é um programa de cálculo de fluxo de potência utilizado nas concessionárias do setor elétrico, e confrontados seus resultados com os obtidos pelo programa DAMPNR [A1], que foi o programa desenvolvido neste trabalho para avaliar o comportamento estático de sistemas elétricos em relação à estabilidade de tensão. A versão atual do programa DAMPNR [A1] encontra-se implementada para uso em microcomputadores IBM-PC compatíveis 386 e 486 [A1].

5.2 Formas de Análise

Um tipo de procedimento bastante utilizado nos trabalhos referenciados na seção 2.2.1, consiste em aumentar aos poucos a carga do sistema até que ocorra divergência do fluxo de potência. Vários esquemas similares foram propostos: aumentar a carga reativa em uma só barra, aumentar a carga ativa em uma só barra, aumentar as cargas reativa e ativa em uma só barra, aumentar a carga em todas as barras na mesma proporção, etc.

A mudança correspondente de geração para atender a carga pode ser atribuída apenas à barra "swing", a todos os geradores de acordo com os fatores de participação das unidades ou em todos os geradores sob despacho econômico. A carga é considerada máxima quando o algoritmo de resolução do fluxo de potência diverge, ou os fatores de sensibilidade ou derivadas são muito grandes.

Outra maneira de análise consiste em elaborar uma lista de contingências (perda de capacitores, perda de uma linha importante para a o suporte de reativos, etc.) consideradas críticas e simular a partir do ponto em que o sistema encontra-se sobrecarregado, fazendo-se a análise da evolução do perfil de tensão para cada caso.

5.3 Sistema IEEE-30

Os resultados apresentados a seguir são do Sistema IEEE-30 barras[36],[A2], o qual por ser um sistema consagrado pela literatura, é apresentado para ilustrar a aplicação da técnica proposta. Inúmeros trabalhos utilizam este sistema como exemplo para o estudo do fenômeno do colapso de tensão, o que motivou o seu uso neste trabalho. Os resultados das análises estão divididos em duas partes: na primeira parte as cargas do sistema são modeladas como um polinômio, sendo as cargas ativas e as cargas reativas representadas como injeções de potência constante, e na segunda parte as cargas ativas e reativas são representadas como impedância constante, também na forma de um polinômio.

A fim de se analisar o problema de instabilidade de tensão, optou-se por considerar uma sobrecarga uniforme em todo o sistema, e avaliar o desempenho do mínimo valor singular das matrizes propostas.

5.3.1 Carga modelada como potência constante

Neste primeiro tipo de teste modelou-se a carga do sistema como injeção de potência constante, e observou-se a Decomposição em Valores Singulares das matrizes Jacobiana (J) e G (esta mostrada na seção 4.1.2.1). Os mínimos valores singulares dessas matrizes com o correspondente percentual de sobrecarga uniforme ao longo do sistema são mostrados na figura 5.1 e na figura 5.2.

Sobrecarga(%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Val. Sing. -J	0,2035	0,1964	0,1962	0,1912	0,1858	0,1788	0,1697	0,159	0,1465	0,129
Val. Sing.- G	0,4206	0,4712	0,3977	0,3832	0,3678	0,3477	0,3220	0,2936	0,2626	0,223

Figura 5.1 - Mínimo valor singular da matriz J e da matriz G

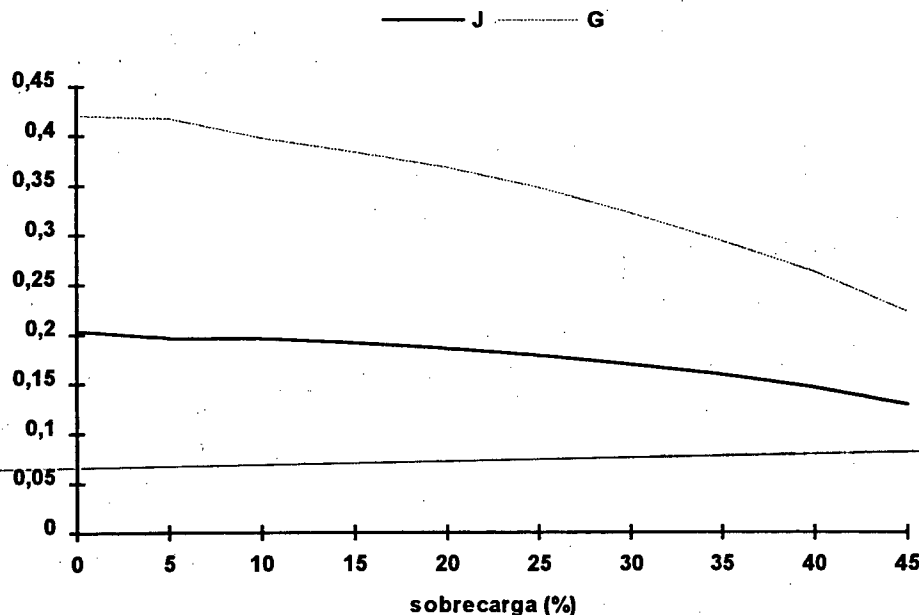


Figura 5.2 - Comparação do mínimo valor singular da matriz J e da matriz G em relação a sobrecarga do sistema

Nota-se nesta figura que o decréscimo do mínimo valor singular, σ_n , da matriz J é menos acentuado em função da sobrecarga do que o da matriz G. Isto decorre do fato da matriz J estar relacionada intimamente a problemas angulares da estabilidade em regime permanente, o que não permite que sua variação seja brusca em relação a problemas somente de tensão. A matriz G possui variação mais acentuada porque, na sua formação, a injeção de potência ativa, ΔP , é feita igual a zero, o que resulta em uma matriz que relaciona a sensibilidade da tensão com a potência reativa, explorando o desacoplamento entre as malhas P δ e QV.

A figura 5.3 apresenta a tabela de valores da matriz G, sem recuperação das barras PV após sua conversão para PQ, e a figura 5.4 o gráfico destes valores.

Sobrecarga(%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Val. Sing. - G	0.3364	0.3063	0.2706	0.2606	0.2500	0.1553	0.1431	0.1201	0.1005	0.0919

Figura 5.3 - Mínimo valor singular da matriz G - sem recuperação das barras PV

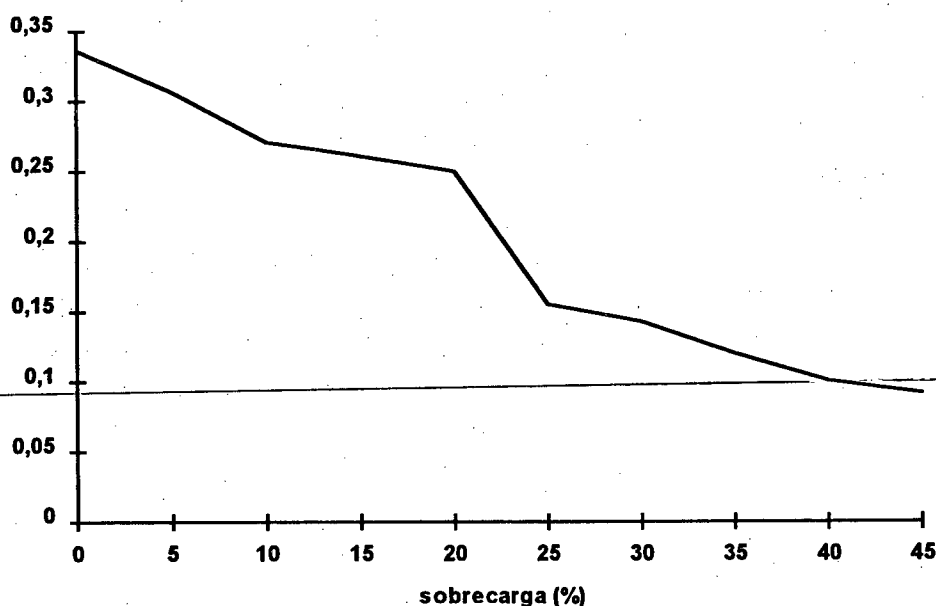


Figura 5.4 - Mínimo valor singular da matriz G - sem recuperação das barras PV

No gráfico da figura 5.4 pode-se notar quedas bruscas no valor do mínimo valor singular, σ_n , da matriz G. Estas quedas são devido ao esgotamento de

suprimento de potência reativa das barras PV, e se manifestam toda vez que uma barra PV é convertida em barra PQ, sendo neste momento aumentada a dimensão da matriz Jacobiana, e por conseguinte reduzido o valor numérico do mínimo valor singular. Este gráfico demonstra claramente a deficiência de reativos do sistema quando este fica sujeito a uma sobrecarga, refletindo claramente a importância das fontes de reativos e seus efeitos no colapso de tensão se forem inadequadamente alocadas e operadas.

A figura 5.5 é constituída pela tabela de valores de tensão das barras mais sujeitas a instabilidade de tensão. A figura 5.6 apresenta graficamente a evolução do perfil destas tensões.

Sobrecarga(%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
V 19	0.9200	0.9127	0.9019	0.8901	0.8775	0.8586	0.8321	0.8020	0.7686	0.7233
V 20	0.9231	0.9159	0.9050	0.8933	0.8806	0.8618	0.8357	0.8060	0.7726	0.7283
V 21	0.9257	0.9181	0.9065	0.8939	0.8804	0.8612	0.8351	0.8054	0.7720	0.7276
V 24	0.9285	0.9204	0.9082	0.8950	0.8808	0.8606	0.8330	0.8015	0.7661	0.7189
V 26	0.9382	0.9290	0.9147	0.8990	0.8828	0.8607	0.8313	0.7907	0.7596	0.7086
V 30	0.951	0.9420	0.9267	0.9100	0.8928	0.8699	0.8400	0.8056	0.7660	0.7139

Figura 5.5 - Valores de tensões das barras sujeitas a instabilidade de tensão

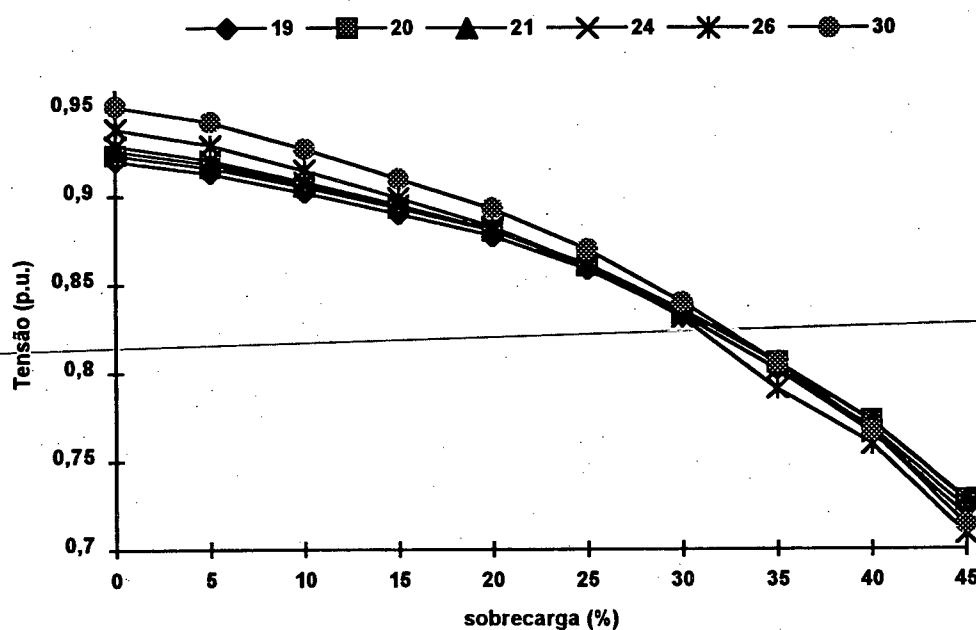


Figura 5.6 - Perfil de tensão das barras sujeitas a instabilidade de tensão em relação a sobrecarga do sistema

Através da tabela apresentada na figura 5.5 e do gráfico representado na figura 5.6, pode-se notar a evolução das seis tensões das barras sujeitas a instabilidade de tensão. É importante notar que o perfil das tensões tem um comportamento semelhante. Isto deve-se ao fato das barras críticas estarem localizadas em uma mesma região.

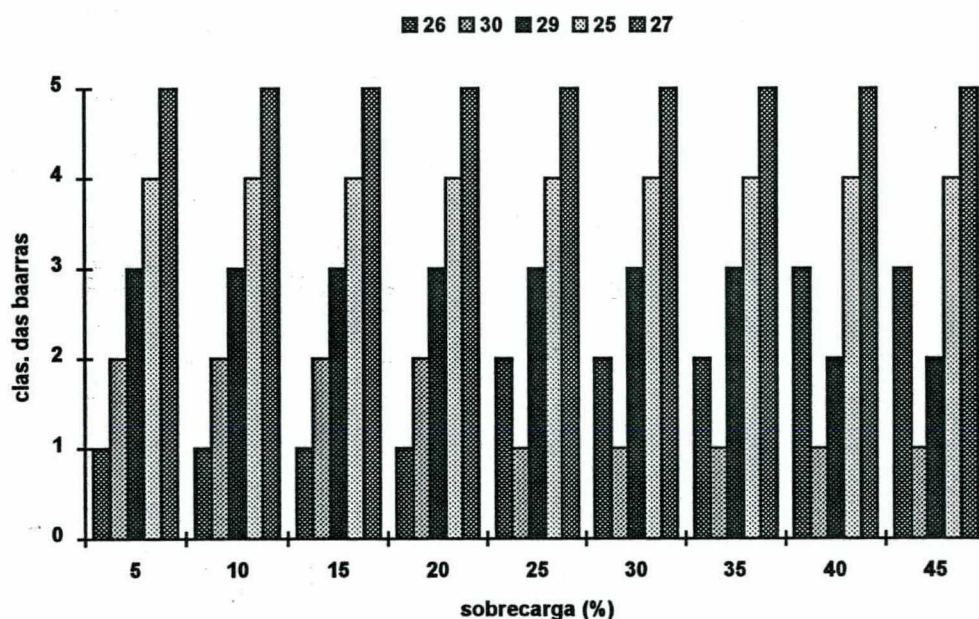


Figura 5.7 - Classificação das barras sujeitas a instabilidade de tensão em relação à sobrecarga do sistema

Deve-se notar no gráfico da figura 5.7 que até uma sobrecarga de 20% não há inversão na ordem das barras críticas sujeitas a instabilidade de tensão, portanto a sobrecarga é bem assimilada pelo sistema. Após este valor há uma inversão nas três primeiras posições, determinadas pela sensibilidade do mínimo valor singular do vetor direito. Isto é devido às variáveis destas barras serem mais sensíveis ao mínimo valor singular para esta condição de operação, indicando que a área onde estão localizadas estas barras é potencialmente sujeita ao colapso de tensão.

A figura 5.8 apresenta a tabela da variação dos valores singulares da matriz G_v e da matriz G_v^* sem recuperação respectivamente das barras PV após sua conversão para barras PQ. A figura 5.9 é a representação gráfica destes valores.

Sobrecarga (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Val. Sing.- G_v	0,3858	0,378	0,3660	0,3535	0,3404	0,3225	0,3005	0,2764	0,2495	0,2163
Val. Sing.- G_v^*	0,3153	0,2993	0,2630	0,2542	0,2450	0,1602	0,1494	0,1378	0,1249	0,1089

Figura 5.8 - Valor singular da matriz G_v e G_v^*

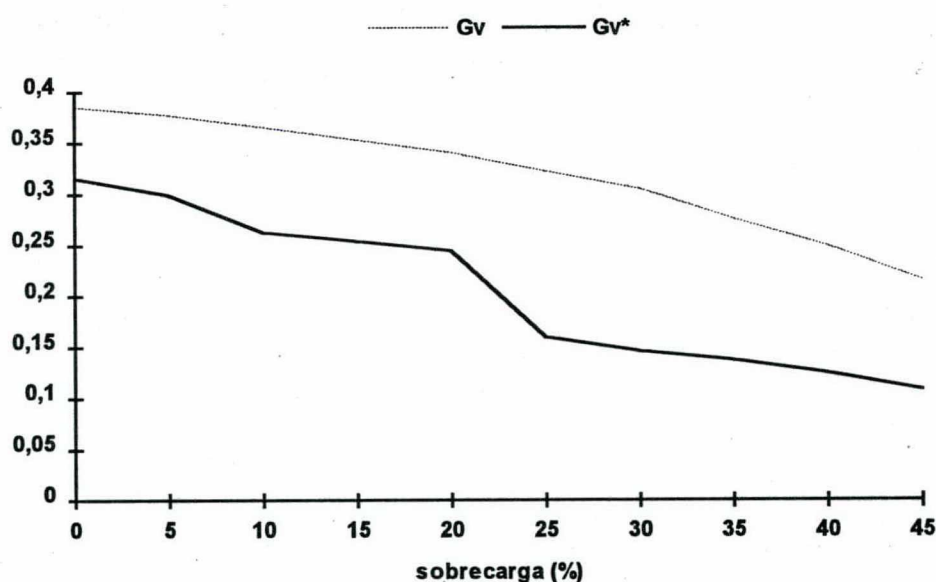


Figura 5.9 - Comparação do mínimo valor singular da matriz G_v e da Matriz G_v^* sem recuperação das barras PV

A análise do gráfico da figura 5.9 permite determinar o comportamento qualitativo do sistema frente à instabilidade de tensão, com um esforço computacional menor, embora seu uso dependa da verificação da matriz H , a qual determina se o sistema tem comportamento angular satisfatório. Nota-se que o comportamento da matriz G_v é semelhante ao da matriz G da figura 5.2, e o comportamento da matriz G_v^* ao da matriz

G da figura 5.4. Conclui-se com isto, que estas matrizes apresentam informações semelhantes e úteis para a análise do sistema considerando o desacoplamento das malhas P δ e QV.

5.3.2 Carga modelada como impedância constante

Nesta subseção, são apresentados os resultados da simulação do sistema IEEE30 utilizando o modelo de impedância constante para representar a parte ativa e reativa da carga do sistema.

A figura 5.10 apresenta a tabela dos mínimos valores singulares para as matrizes J e G respectivamente, e a figura 5.11 mostra estes valores graficamente.

Sobrecarga(%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Val. Sing. - J	0,2134	0,2125	0,2112	0,2067	0,2067	0,2043	0,2022	0,2001	0,1998	0,1875
Val. Sing. - G	0,4919	0,4719	0,4668	0,4600	0,4529	0,4455	0,4389	0,4354	0,4300	0,4256

Figura 5.10 - Mínimo valor singular da matriz J e da matriz G

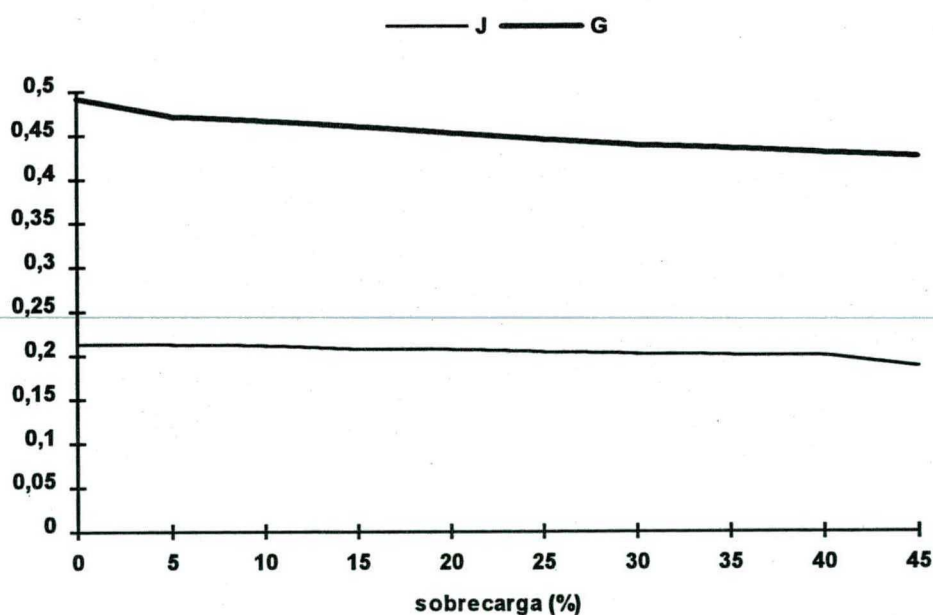


Figura 5.11 - Comparação do mínimo valor singular da matriz J e da matriz G em relação a sobrecarga do sistema

É importante notar no gráfico da figura 5.11, que os comportamentos tanto da matriz J, quanto da matriz G possuem uma tendência de decréscimo do mínimo valor singular muito lenta. Comparando-se ao gráfico da figura 5.2 nota-se uma expressiva diferença no comportamento das matrizes. Esta diferença é devida à característica da representação da carga. Na figura 5.11 a representação da parte ativa e reativa é feita 100% de impedância constante. Devido a este fato a carga do sistema sofre um decréscimo com a queda da tensão, dando condições para que o sistema evolua para um ponto de operação em sobrecarga mais seguro.

A figura 5.12 apresenta a tabela de valores da matriz G, sem recuperação das barras PV após sua conversão para PQ, e a figura 5.13 o gráfico destes valores.

Sobrecarga (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Val. Sing. - G	0.400	0.3813	0.3176	0.3136	0.3094	0.3050	0.3011	0.1901	0.1801	0.1720

Figura 5.12 - Mínimo valor singular da matriz G - sem recuperação das barras PV para PQ

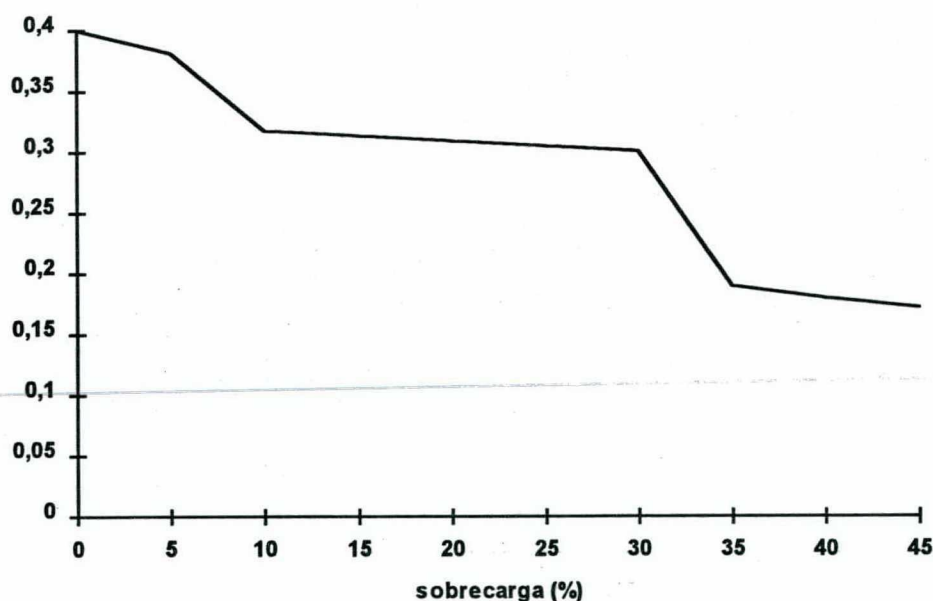


Figura 5.13 - Mínimo valor singular da matriz G - sem recuperação das barras PV

Nota-se no gráfico da figura 5.13 que os níveis de sobrecarga onde acontece a conversão das barras PV para PQ, isto é, devido às barras PV terem atingido seus limites de reativo, ocorrem em um valor de sobrecarga maior que o representado na figura 5.4. Isto deve-se ao fato de que a modelagem da carga adotada nesta seção é menos severa, pois com a queda de tensão no sistema também ocorre uma queda de potência nas cargas, devido a sua dependência com a tensão.

A figura 5.14 é constituída pelos valores de tensão das barras mais sujeitas a instabilidade de tensão. A figura 5.13 apresenta graficamente a evolução do perfil destas tensões.

Sobrecarga (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
V 19	0.9309	0.9273	0.9221	0.9157	0.9090	0.9023	0.8960	0.8948	0.8899	0.8855
V 20	0.9337	0.9301	0.9250	0.9186	0.9119	0.9051	0.8987	0.8973	0.8910	0.8880
V 18	0.9355	0.9320	0.9273	0.9213	0.9151	0.9088	0.9031	0.9029	0.8970	0.8937
V 21	0.9363	0.9326	0.9273	0.9204	0.9133	0.9061	0.8993	0.8966	0.8950	0.8873
V 22	0.9378	0.9342	0.9289	0.9221	0.9150	0.9078	0.9011	0.8984	0.8865	0.8892
V 24	0.9415	0.9360	0.9303	0.9231	0.9157	0.9082	0.9012	0.8985	0.8971	0.8888

Figura 5.14 - Valores de tensões das barras sujeitas a instabilidade de tensão

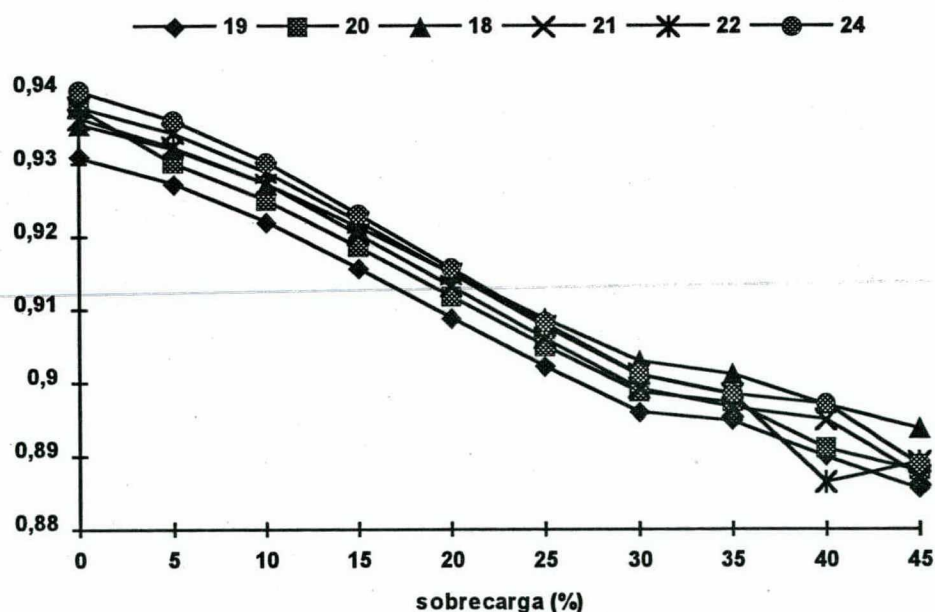


Figura 5.15 - Perfil de tensão das barras sujeitas a instabilidade de tensão em relação a sobrecarga do sistema

O perfil das tensões apresentado na figura 5.15 ilustra bem o comportamento da carga quando a parte ativa e reativa são representadas como 100% impedância constante. Comparando-se os gráficos das figuras 5.15 e 5.6 pode-se observar que o perfil das tensões para o mesmo nível de sobrecarga, apresenta-se menos severo quando a representação polinomial utilizando impedância constante é adotada.

Na figura 5.16, apresentada a seguir, é colocada a classificação das barras sujeitas a instabilidade de tensão com a evolução da sobrecarga aplicada ao sistema.

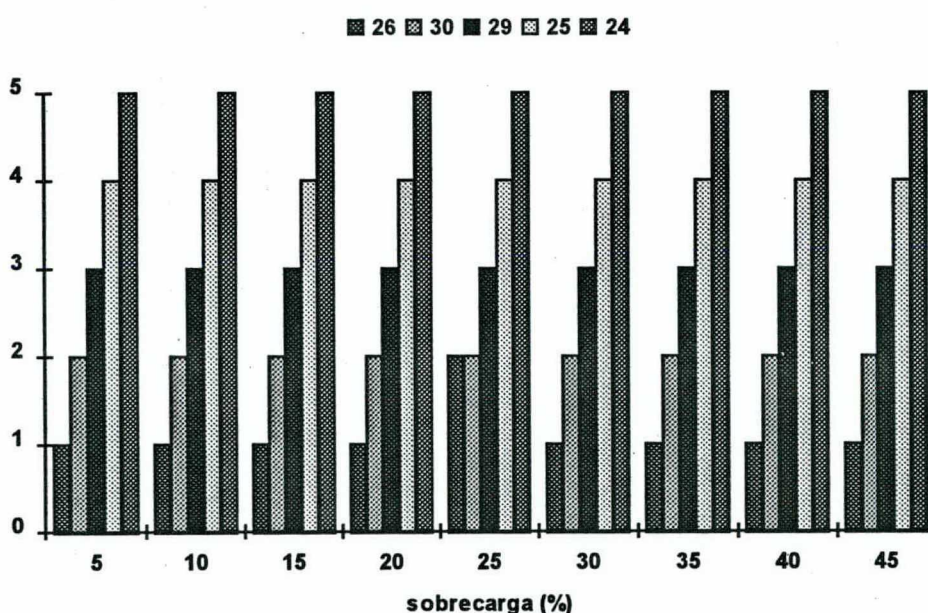


Figura 5.16 - Classificação das barras sujeitas a instabilidade de tensão em relação a sobrecarga do sistema

A ordem de classificação das barras mais sujeitas a instabilidade de tensão para a representação polinomial utilizando impedância constante não muda com a sobrecarga aplicada, como pode ser visualizado na figura 5.16. Isto pode ser interpretado pelo fato da sensibilidade do vetor singular direito, V_n , ser pouco influenciada, devido aos níveis satisfatórios de tensão do sistema, como pode ser observado na figura 5.14.

A figura 5.17 apresenta a tabela da variação dos valores singulares das matrizes G_v e G_v^* . A figura 5.18 é a representação gráfica destes valores.

Sobrecarga (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Val. Sing. - G_v	0,4259	0,4230	0,4182	0,4118	0,4052	0,3985	0,3924	0,3891	0,3810	0,3795
Val. Sing. - G_v^*	0,3980	0,3500	0,3017	0,2979	0,2940	0,2899	0,2863	0,1865	0,1836	0,1770

Figura 5.17 - Valor singular das matrizes G_v e G_v^*

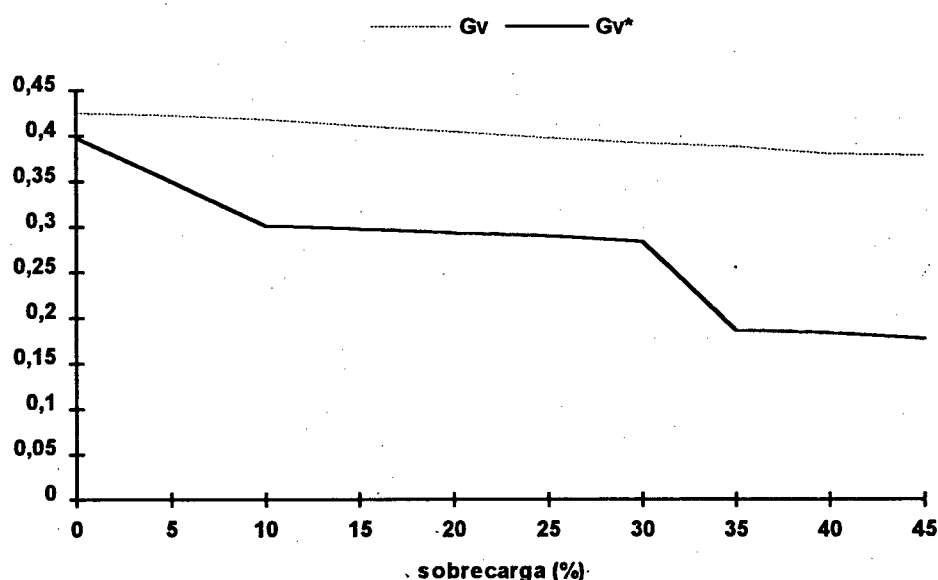


Figura 5.18 - Comparação do mínimo valor singular da matriz G_v e da Matriz G_v^* sem recuperação das barras PV

Analisando-se a figura 5.18, nota-se que quando a carga do sistema está representada por impedância constante, o mínimo valor singular da matriz G_v possui um decréscimo pouco acentuado em função da sobrecarga, e o mínimo valor singular da matriz G_v^* possui um decréscimo mais suave e lento no intervalo onde os geradores esgotam suas potências reativas, demonstrando que o sistema quando adota a representação por impedância constante possui um comportamento mais estável, podendo ser sobrecarregado até um nível mais elevado.

Deve-se observar também que esta matriz avalia o comportamento desacoplado das malhas P δ e QV do sistema, representando um excelente índice qualitativo, sendo interessante comparar-se seu desempenho com a figura 5.13.

5.4 Sistema CEEE-Oeste

Os resultados apresentados a seguir são de um sistema real, operado pela CEEE-RS. Neste trabalho este sistema é um equivalente do sistema principal, representado pelas barras da região oeste, interligadas com o resto do sistema, sendo que este sistema possui 96 barras, 117 linhas de transmissão, 43 transformadores e 20 barras de tensão controlada. A característica principal deste sistema é possuir uma alta carga de motores de indução, operando por sazonalidade. Por ser um sistema real, malhado e com vários níveis de tensão, a matriz admitância, e por conseguinte a matriz Jacobiana é mal condicionada.

Conforme foi apresentado no item 2.3, a forma de análise a ser adotada para o estudo de estabilidade de tensão não é uma regra, e depende das características do sistema a ser estudado. Portanto, neste estudo optou-se por sobrecarregar uniformemente o sistema, aumentando sua carga ativa e reativa, mantendo desta forma o fator de potência típico, procurando distribuir o efeito em todo o sistema, o qual como mencionado anteriormente é extremamente malhado, e com vários níveis de tensão. Com isto, identificaram-se as áreas que apresentam problemas de instabilidade de tensão e as barras críticas.

Outra maneira seria, após identificar as barras críticas passar a realizar sobrecargas localizadas, avaliando o comportamento do mínimo valor singular.

Na análise deste sistema, procurou-se em primeiro lugar identificar as áreas mais sujeitas a instabilidade de tensão, e após analisar o comportamento das

principais barras críticas, de maneira a poder estabelecer o comportamento do mínimo valor singular e do vetor singular direito quando estas barras ou a região sujeita a instabilidade é sobrecarregada.

O modelo de carga adotado para o sistema é o usado pela concessionária para o estudo de fluxo de carga [41], sendo sua parte ativa representada por 25% de potência constante e 75% de impedância constante, e sua parte reativa representada por 100% de impedância constante. Foram feitas simulações com composição de cargas diferentes da adotada pela concessionária, não se obtendo resultados significativos no comportamento do mínimo valor singular, pois as variações utilizadas não podem se afastar muito da modelagem característica, sob pena da representação não descrever o comportamento real do sistema. A região mais sujeita ao colapso de tensão possui alta carga reativa, devido ao grande número de motores de indução, portanto, a representação da parte reativa é fundamental. Mudanças no percentual de representação da parte reativa correm o risco de não descrever o comportamento real do sistema nesta região. Embora a composição da parte ativa possa sofrer alterações mais significativas, seu efeito para o colapso de tensão é menos importante.

A figura 5.19 apresenta a tabela do mínimo valor singular das matrizes J e G, obtidas a partir do caso base.

Sobrecarga (%)	0	1	2	3	4	5
Val. Singular J	0,0325	0,0294	0,0266	0,0221	0,0173	0,0098
Val. Singular G	0,0421	0,0393	0,0356	0,0311	0,0257	0,0171

Figura 5.19 - Mínimo valor singular da matriz J e da matriz G

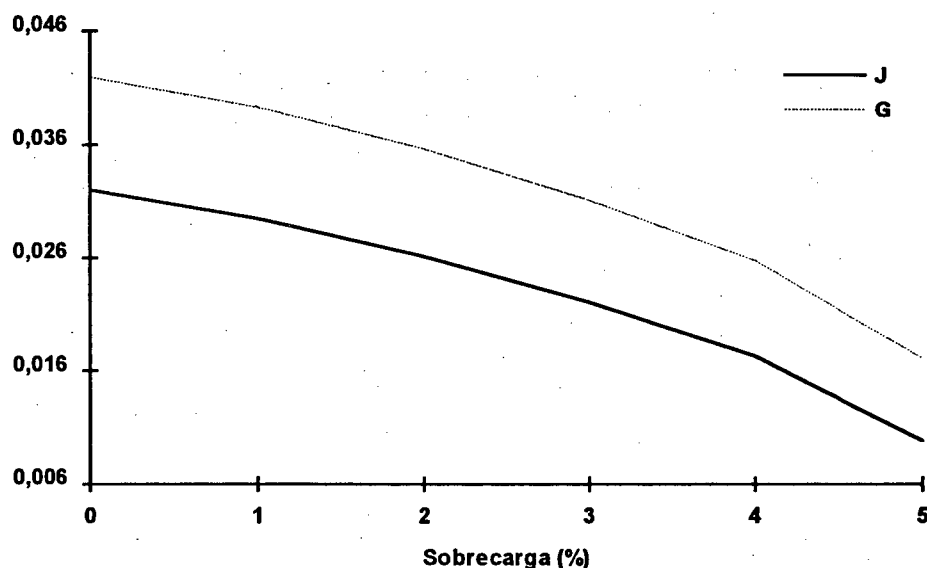


Figura 5.20 - Comparação do mínimo valor singular da matriz J e da matriz G em relação a sobrecarga do sistema

Pode-se analisar pelo comportamento do gráfico apresentado na figura 5.20 que tanto o mínimo valor singular da matriz J quanto da matriz G partem de um valor criticamente baixo, devido ao caso base adotado possuir um carregamento elevado e níveis de tensão baixos. Observando-se a evolução do mínimo valor singular nota-se que ao ser aplicada uma sobrecarga uniforme no sistema a partir do caso base, a partir de 5% o sistema entra em estado crítico de instabilidade de tensão, partindo deste ponto para uma condição de colapso de tensão.

Não é apresentado neste item o mínimo valor singular da matriz G sem recuperação das barras PV após sua conversão para PQ, pois devem ser feitos ajustes para convergência do fluxo de potência, devendo-se deixar o sistema evoluir seu processo de convergência com as primeiras iterações sem considerar os limites de reativos das barras PV. Isto deve-se ao fato do caso base utilizado para ilustrar a técnica ser altamente crítico do ponto de vista de níveis de tensão. Portanto, os resultados desta matriz não iriam refletir

o comportamento correto deste sistema. Também não foram analisadas as matrizes G_v e G_v^* , pelo mesmo motivo.

Caso seja de interesse avaliar o comportamento destas matrizes, pode-se dividir o sistema em subsistemas menores, possibilitando desta forma condições para o seu uso, embora alguns efeitos a nível de sistema não sejam preservados.

A figura 5.21 apresenta a tabela de valores para as tensões das barras críticas sujeitas a instabilidade de tensão, e a figura 5.22 apresenta o gráfico destes valores.

Sobrecarga (%)	0	1	2	3	4	5
V 87	0,942	0,923	0,901	0,875	0,842	0,790
V 95	0,952	0,934	0,912	0,886	0,854	0,803
V 94	0,963	0,944	0,923	0,898	0,866	0,816
V 85	0,972	0,954	0,933	0,908	0,877	0,828
V 93	0,996	0,979	0,959	0,936	0,907	0,861
V 92	0,908	0,892	0,875	0,853	0,827	0,786

Figura 5.21 - Valores de tensões das barras sujeitas à instabilidade de tensão

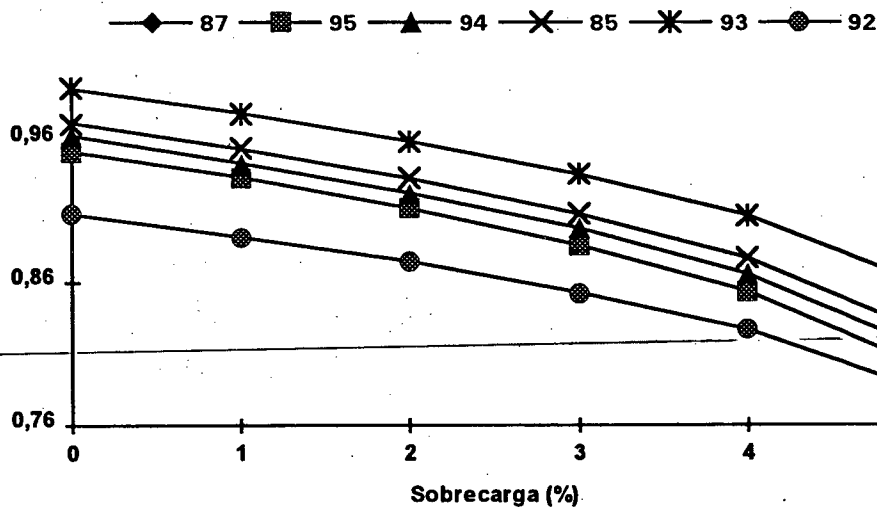


Figura 5.22 - Perfil de tensão das barras sujeitas a instabilidade de tensão em relação à sobrecarga do sistema

Observa-se através do comportamento das tensões mostradas na figura 5.22, que o perfil de todas as tensões críticas tem um comportamento semelhante, isto é

devido as barras estarem localizadas em uma mesma região sujeita ao colapso, e suas fontes de reativos serem comuns e não tendo condições de suportar seus níveis de tensão. Se observarmos as tensões obtidas do fluxo de potência apresentados na figura 5.23 notaremos que as menores tensões não coincidem com as tensões críticas apresentadas na figura 5.21.

Sobrecarga (%)	0	1	2	3	4	5
V 70	0,8311	0,8181	0,8036	0,7861	0,7653	0,7335
V 66	0,8696	0,8550	0,8455	0,8299	0,8113	0,7824
V 53	0,8764	0,8656	0,8357	0,8390	0,8217	0,7948
V 82	0,8761	0,8662	0,8555	0,8431	0,8290	0,8093
V 89	0,8879	0,8727	0,8557	0,8355	0,8113	0,7745
V 39	0,8891	0,8788	0,8674	0,8533	0,8360	0,8108

Figura 5.23 - Valores das menores tensões do sistema

Estas tensões estão localizadas em regiões onde a carga é bastante pesada, mas possuem suporte de reativo capaz de sustentar seus valores para operação, mesmo sendo extremamente baixos. Deve-se notar que estes valores de tensão são obtidos após o sistema ser carregado até o seu extremo, de maneira a poder determinar um mínimo valor singular crítico para a operação do sistema, sendo estes valores obtidos graças ao método de Newton amortecido usado neste trabalho para cálculo do fluxo de potência.

A figura 5.24 apresenta a classificação das barras sujeitas a instabilidade de tensão a medida que evolui a sobrecarga aplicada no sistema.

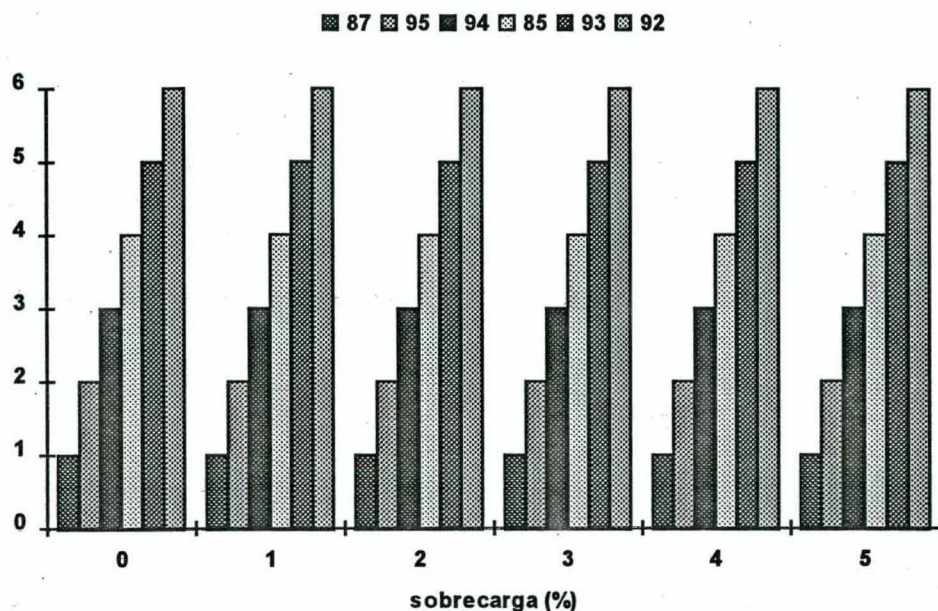


Figura 5.24 - Classificação das barras sujeitas a instabilidade de tensão em relação a sobrecarga do sistema

É importante notar que não há inversão na ordem de prioridade das barras. Isto indica que a região das quais elas fazem parte é a mais crítica, pois a sensibilidade destas barras em relação ao mínimo valor singular mantém-se durante a sobrecarga aplicada até que haja o colapso de tensão.

5.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados correspondentes as simulações efetuadas nos sistemas exemplos, IEEE 30 e CEEE-Oeste. Os resultados foram sumarizados na forma de tabelas e gráficos, sendo apresentado, após cada gráfico, os comentários pertinentes a sua interpretação.

Os resultados obtidos da simulação do sistema IEEE 30 barras confirmaram os resultados encontrados na literatura [16],[17], o que contribui para validar o método desenvolvido neste trabalho. Resultados dos mínimo valores singulares das

matrizes analisadas mostraram-se excelentes indicadores, principalmente porque foram avaliados em torno do ponto de colapso de tensão, o qual foi proporcionado pelo uso do algoritmo de Newton-Raphson com amortecimento.

Os resultados obtidos através da simulação do sistema CEEE-Oeste confirmaram os resultados encontradas na operação deste sistema, os quais são de conhecimento do autor, o que mais uma vez reforça a potencialidade do método, permitindo sua utilização como uma ferramenta eficaz para o planejamento de sistemas de potência e para auxiliar os operadores na determinação de procedimentos operativos para evitar o colapso de tensão através da identificação de áreas críticas.

No último capítulo desta dissertação são apresentadas as conclusões finais mais relevantes desta pesquisa e as recomendações para futuros trabalhos.

Capítulo 6

Conclusões

No presente trabalho, aprofundou-se o estudo do método de Decomposição em Valores Singulares, visando comprovar resultados obtidos em trabalhos anteriores e analisando um novo tipo de abordagem para o problema, a qual consiste no uso do algoritmo de Newton-Raphson amortecido com modelagem polinomial de carga associado à Decomposição em Valores Singulares. Esta metodologia pode ser útil na avaliação do processo de divergência e evolução do mínimo valor singular quando o sistema está submetido a uma sobrecarga, de maneira que seu ponto de operação encontra-se próximo da região conhecida como "bifurcação estática", e portanto, o sistema está próximo do ponto do colapso de tensão.

A validade dos algoritmos desenvolvidos foi demonstrada através dos exemplos de aplicação ao sistema teste IEEE30 [A1], constituído de 30 barras, e ao sistema CEEE Oeste, constituído de 96 barras [A2], sendo este último um sistema real.

Com relação ao desempenho do algoritmo de Decomposição em Valores Singulares, pode-se resumir as seguintes características observadas com base nos resultados numéricos obtidos, os quais confirmam os resultados apresentados na literatura :

- A técnica de decomposição em valores singulares é numericamente robusta ;
- O mínimo valor singular da matriz Jacobiana demonstrou ser um bom índice para a determinação da proximidade do colapso de tensão, devido à alta sensibilidade quando o sistema está submetido a uma sobrecarga;
- O vetor singular direito determina quais das variáveis de estado, δ ou V , possuem maior influência nas barras sujeitas a instabilidade de tensão, e proporciona a identificação das barras mais críticas quanto à instabilidade de tensão;
- O vetor singular esquerdo possibilita determinar a influência das injeções de potência , ativa e reativa, na instabilidade de tensão;
- O mínimo valor singular da matriz Jacobiana, é mais sensível a problemas de estabilidade angular em regime permanente do que a problemas de estabilidade de tensão, embora também possa ser considerado como um indicativo de problemas de instabilidade de tensão;
- O mínimo valor singular da matriz G é um bom indicativo da proximidade de colapso de tensão, pois demonstra o esgotamento das fontes de reativos no sistema, indicando os valores de sobrecarga para os quais as barras PV atingem seus limites;
- Embora a matriz Gv^* possa fornecer um bom indicativo do comportamento reativo do sistema sob o ponto de vista qualitativo, deve-se observar que quando o sistema possui áreas com diversos níveis de tensões, o erro devido ao baixo grau de desacoplamento das variáveis pode limitar seu uso.

Em relação ao método de Newton-Raphson amortecido, usado para o cálculo do fluxo de potência, as seguintes características observadas comprovam resultados obtidos na literatura :

- Quando a função de resíduos indica que o processo iterativo está tendendo para a divergência e o fator de amortecimento está sendo usado, o vetor X obtido, embora não seja a solução real do fluxo de potência, proporciona muitas informações acerca do comportamento do sistema quando a matriz Jacobiana tende gradativamente para a singularidade;

- O uso do método de Newton amortecido possibilita uma análise mais detalhada do comportamento do sistema, pois devido a sua característica pode-se chegar próximo do ponto onde o sistema diverge quando são aplicados métodos tradicionais, resultando desta vantagem a análise de tensões extremamente baixas e sua relação com o colapso de tensão.

Com relação à modelagem dos componentes do sistema de potência, as seguintes observações podem ser colocadas :

- O uso de uma modelagem adequada para os componentes do sistema, descrevendo matematicamente mais precisamente os componentes, é de fundamental importância para obtenção de resultados confiáveis do fluxo de potência, principalmente no que diz respeito aos LTC's e as cargas;

- A modelagem da carga deve ser tratada com muito cuidado, pois o uso de um modelo correto que represente o mais realisticamente possível o seu comportamento é fundamental para que os resultados obtidos sejam confiáveis;

- O transformador com mudança de tap sob carga (LTC) deve ser cuidadosamente modelado. A sua atuação é fundamental. Muitas vezes ao invés de contribuir para melhorar a estabilidade de tensão ele atua no sentido de degradar a tensão do sistema. Portanto a sua área de atuação deve ter atenção especial, principalmente em se tratando de sistemas altamente malhados, como o sistema real CEEE-Oeste apresentado neste trabalho.

Neste trabalho a matriz de sensibilidade foi utilizada como uma ferramenta complementar para permitir determinar quais os controles são mais efetivos para o controle da instabilidade de tensão das barras críticas.

O uso da Decomposição em Valores Singulares em conjunto com o método Newton-Raphson amortecido, permite que as seguintes observações sejam feitas:

- Nem sempre a barra de menor tensão corresponde à barra mais sujeita a instabilidade de tensão, sendo que este resultado foi comprovado pelo conhecimento das condições de operação reais do sistema CEEE Oeste;
- A forma de análise a ser adotada (aumento de carga ativa e reativa, perda de fonte de reativos, aumento somente da potência ativa, etc) para o estudo de um sistema sujeito a instabilidade de tensão depende da topologia do sistema e das condições de operação a que o sistema esteja sujeito;
- Muitas vezes é aconselhável dividir o sistema em sub-áreas, principalmente se existe uma independência das fontes de suporte de reativos. Isto permite reduzir o tamanho do sistema e concentrar a análise no sistema reduzido, pois os efeitos são localizados em uma vizinhança restrita das barras críticas;
- A modelagem polinomial de carga mostrou ser fator determinante no comportamento da estabilidade de tensão, como demonstram os resultados obtidos no sistema IEEE30, onde foram usados os dois extremos de modelo, o chamado "otimista", isto é, a modelagem da potência ativa e reativa através de impedância constante, e o "pessimista", que é a modelagem da parte ativa e reativa por potência constante;
- Algumas variações de modelo de carga foram testadas no sistema CEEE-Oeste, diferentes do adotado para o caso real, não se obtendo resultados significativos, devido à natureza de distribuição e composição das cargas;

- Em ambos os casos, nota-se que a modelagem da parte reativa do modelo polinomial possui um peso maior na proximidade da instabilidade de tensão;
- O caso base adotado para o sistema CEEE Oeste foi o pior caso em termos de operação para o sistema, sendo seus níveis de operação de tensão extremamente críticos, permitindo desta forma que a técnica utilizada e a eficiência do algoritmo na identificação do colapso de tensão e das barras críticas fossem validados;
- No sistema CEEE Oeste, a localização das barras críticas em áreas com alta concentração de carga ativa e reativa, e com deficiência de fontes de reativos demonstra claramente a fragilidade do sistema frente a instabilidade de tensão, principalmente em se tratando de sistemas radiais partindo de barras com baixo suporte de reativos;
- Resultados semelhantes quanto à localização de barras críticas em relação a problemas de instabilidade de tensão foram obtidos no sistema IEEE30, caracterizando neste sistema duas áreas sujeitas a colapso, ambas partindo da mesma barra.

De acordo com as considerações apresentadas acima, conclui-se que a metodologia proposta apresenta um bom desempenho para sua aplicação no planejamento e operação de sistemas de potência, sendo uma ferramenta eficaz para dotar o analista de sistemas de potência de sensibilidade a problemas de estabilidade de tensão, devido a variações dos parâmetros e das condições de operação do sistema estudado.

6. 1 Sugestões para Futuros Trabalhos

Outros desenvolvimentos a partir da técnica de Decomposição em Valores Singulares podem ser desenvolvidos, sendo sugeridos para trabalhos subseqüentes:

- Determinação de medidas corretivas e preventivas para evitar o colapso de tensão, usando técnicas de otimização estática a partir de informações obtidas dos vetores singulares associados ao mínimo valor singular;
- Comparação dos resultados obtidos neste trabalho com simulações de dinâmica lenta, visando determinar o comportamento das áreas críticas em relação a instabilidade de tensão;
- Utilização da análise modal para comparação dos resultados obtidos;
- Utilização do algoritmo de Newton-Raphson com coordenadas retangulares para análise do comportamento do mínimo valor singular da matriz Jacobiana;

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE Tutorial Voltage Stability of Power Systems : Concepts, analytical Tools, and Industry Experience - 1990

- [2] CIGRE - Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena , prepared by Task Force 38.02.10

- [3] Taylor, C. W. "A perspective on Voltage Stability with Emphasis on Load Characteristics". II SEPOPE, Ago 89, invited paper n° 10.

- [4] Navarro-Perez,R. ; Short, M. J. ; Rios-Zalappa, R. ; Prada, R. B. "Relation Between Voltage Collapse and Classical Steady-State Stability Limit". 10 Th PSCC - Graz-Austria 1990

- [5] Kimbark, E. W. *Power Systems: Synchronous Machines*. Dover Publications 1968

- [6] Task Force on Terms and Definitions "Proposed Terms and Definitions for Power Systems Stability". *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, p. 1034 - 1041, Julho 1982.

- [7] Venikov, V.A.; Stroeve, V.A. ; Idelchick, V.I. ; Tarasov , V.I., "Estimation of Electrical Power System Steady-State Stability in Load Flow Calculations". *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, p. 1034 - 1041, Maio/Junho 1975.

- [8] Y. Tamura et al. : " Relationship between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solutions in Electric Power Systems " . *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-102, p. 1115-1125, Maio 1983.

- [9] Abe, S. et. al "Load Flow Convergence in the Vicinity of a Voltage Stability Limit" . *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-97, p. 1983-1993, Nov/Dez de 1978

- [10] Kessel, P. ; Glavitsch, H. " Estimating the Voltage Stability of a Power System". *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. PWRD-1, p.346-354, Maio 1986.

- [11] Schlueter, R. A. ; Hu, I. ; Chang, J. C. ; Costi, A. " Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse " . *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, p. 285-291, Fevereiro 1991.

- [12] Van Cutsem, T. "A Method to Compute Reactive Power Margins with respect to Voltage Collapse". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 6, p. 145-156, fevereiro 1991
- [13] Flatabo, N. ; Ognedal, R. ; Carlsen, T. "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 5, p. 1286-1293, novembro 1990
- [14] Begovic, M. M. ; Phadke, A. G. "Control of Voltage Stability using Sensitivity Analysis". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 7, p. 114-123, fevereiro 1992
- [15] Tiranuchit, A. ; Thomas, R. J. " A Posturing Strategy against Voltage Instabilities in Electric Power Systems " . *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, p. 87-93, Fevereiro 1988.
- [16] Lof, P. A. ; Smed, T. ; Anderson, G. " Fast Calculation of a Voltage Stability Index" , *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, p. 54-64, Fevereiro 1992.
- [17] Lof, P. A. ; Hill, D. J. ; Anderson, G. " Voltage Stability Indices for Stressed Power Systems" , *IEEE/PES 1992, Winter Meeting*, New York, NY, Jan 26 - 30
- [18] Srivastana, K. N. ; Srivastana, S. C. ; Kalra, P. K. "Prediction of Voltage Collapse in an Integrated AC-DC Network using the Singular Value Decomposition Concept". *Electric Power Systems Reserch*, vol. 28, pp. 111-122, 1993

- [19] Gao, B. ; Morison, G. K. ; Kundur, P. "Voltage Stability Using Modal Analysis". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 7, p. 1529-1542, novembro 1992
- [20] Vargas, L. ; Quintana, V. H. "Clustering Techniques for Voltage Collapse Detection". *Electric Power Systems Reserch*, vol. 26, pp. 53-59, 1993
- [21] Canizares, C. A. ; Alvarado, F. L. "Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems". *IEEE/PES 1992 Winter Meeting*, New York, Jan 26-30, 1992
- [22] Kwatny, H. G. ; Pasrija, A. K. ; Bahar, L. Y. "Static Bifurcations in Electric Power Networks : Loss of Steady-State Stability and Voltage Collapse". *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. CAS-33, p.981-991, outubro 1986
- [23] Löf, P.A. ; Hill, D. J. ; Arnborg, S. ; Andersson, G. "On the Analysis of Long-Term Voltage Stability". *Electrical Power & Energy Systems* , vol. 15, p.229-238, agosto 93
- [24] Sauer, P. W. ; Pai, M. A. "Power System Steady-State Stability and Load-Flow Jacobian". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 5, p. 1374-1383, novembro 1990
- [25] Rajagopalan, C. ; Lesieutre, B. ; Sauer, P. W. ; Pai, M. A. "Dynamic Aspects of Voltage/Power Characteristics". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 7, p. 990-1000, agosto 1992

- [26] Xu, W. ; Mansour, Y. "Voltage Stability Using Generic Dynamic Load Models". *IEEE/PES 1993, Winter Meeting*, Columbus, OH, Jan 31 - Fev 5
- [27] Morison, G. K. ; Gao, B. ; Kundur, P. "Voltage Stability Using Static and Dynamic Approaches ". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, p. 1159-1171, novembro 1993
- [28] Stubbe, M. ; Bihain, A. ; Deuse, J. "Simulation of Voltage Collapse". *Electrical Power & Energy Systems* , vol. 15, p.239-243,agosto 93
- [29] Gönan, T. *Modern Power Systems Analysis* John Wiley & Sons 1988
- [30] Stewart, G. W. *Introduction to Matrix Computations* Academic Press, Inc. 1973
- [31] Golub, G. H. ; Van Loan, C. F. *Matrix Computations* ,The Johns Hopkins University Press, 2º Ed., 1989
- [32] Guckenheimer, J. ; Holmes, P. *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcation of Vector Fields*
- [33] Monticelli , A. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica* - Editora Edgard Blücher Ltda 1983

- [34] Stott, B. ; Alsac, O. "Fast Decoupled Load Flow ". *IEEE Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-93, p. 859-869, jun 1974
 - [35] Dehnel, M. ; Dommel, H. W. "A Method for Identifying Weak Nodes in Nonconvergent Load Flows". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 4, p. 801-807, maio 1989
 - [36] Pai ,M. A. *Computer Techniques in Power Systems Analysis*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1980
 - [37] Kundur, P. ; Morison, K. ; Gao, B. "Practical Considerations in Voltage Stability Assessment". *Electrical Power & Energy Systems* , vol. 15, p.205-216,agosto 93
 - [38] Arrillaga J. e Arnold, C. P. *Computer Modelling of Electrical Power Systems* Editora John Wiley & Sons 1983
 - [39] Ajjarapu, V. ; Lee, B. "Bifurcation Theory and Its Application to Nonlinear Dynamical Phenomena in an Electrical Power System". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 7, p. 424-431, fevereiro 1992
-
- [40] Yorito, N. ; Sazaki, H. ; Masuda, Y. ; Tamura, Y. ; Kitagawa, M. and Oshimo, A. "An Investigation of Voltage Instability Problems" . *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 7, p. 600-611, maio 1992.

- [41] GCOI-SCEL-GTEE "Modelo de Carga para Estudos de Estabilidade". Relatório Técnico , Eletrobrás , novembro 1989
- [42] Reactive Power Compensation and Voltage Stability: removing transmission limitations, Carson W. Taylor, Curso ministrado no III SEPOPE
- [43] IEEE Task Force "Load Representation for Dynamic Performace Analysis" *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, p. 472-482, maio 1993
- [44] Linpack User's Guide
- [45] Lahey Fortran Language System - Reference Manual
- [46] Manual do Programa Bigpower
- [47] Becon Lemos, F.A ; Werberich, L. C.; De Boni, A. " Esquemas de Corte de Carga por Subtensão no Subsistema Oeste da CEEE ". Reunião Anual do Grupo de Operação Regional (COR- Oeste), Santana do Livramento, 26 e 27 outubro de 1990 , Trabalho SOSP/DES 050/90, Companhia Estadual de Energia Elétrica
- [48] Becon Lemos, F.A ; Werberich, L. C. " Análise Dinâmica da Influência da Usina Presidente Médici nos Sistemas Sul e Oeste da CEEE ". Trabalho SOSP/DES 049/90, Companhia Estadual de Energia Elétrica, Apresentado no Grupo

Coordenador da Operação Interligada (GCOI) , Subcomite de Estudos Elétricos
(SCEL/GTAS) , Eletrobrás, Agosto de 1989, Rio de Janeiro, RJ

Apêndice A1

Programa

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema chamado de DAMPNR, que analisa o comportamento do sistema em regime permanente frente a problemas de instabilidade de tensão, proporcionando a análise do problema quando o sistema encontra-se em situações críticas, isto é, quando o nível de tensão no sistema atinge valores extremamente baixos e passam a existir problemas de convergência no fluxo de potência.

O sistema DAMPNR é composto basicamente dos três módulos apresentados abaixo :

- Cálculo do Fluxo de Potência via Newton-Raphson Amortecido;
- Decomposição em Valores Singulares;
- Análise das Condições de Estabilidade de Tensão.

A rotina de cálculo do fluxo de potência via Newton-Raphson Amortecido foi implementada utilizando-se o algoritmo proposto por Dehnel e Dommel [35], e faz uso também de rotinas desenvolvidas no Labspot para tratamento do problema da esparsidade e de

rotinas utilizadas nos métodos convencionais de cálculo de fluxo de potência. As entradas de dados de linhas e barras, bem como as opções de controle do fluxo de potência seguem o padrão do programa BIGPOWER[46], e podem ser obtidas com maiores detalhes no manual do programa DAMPNR.

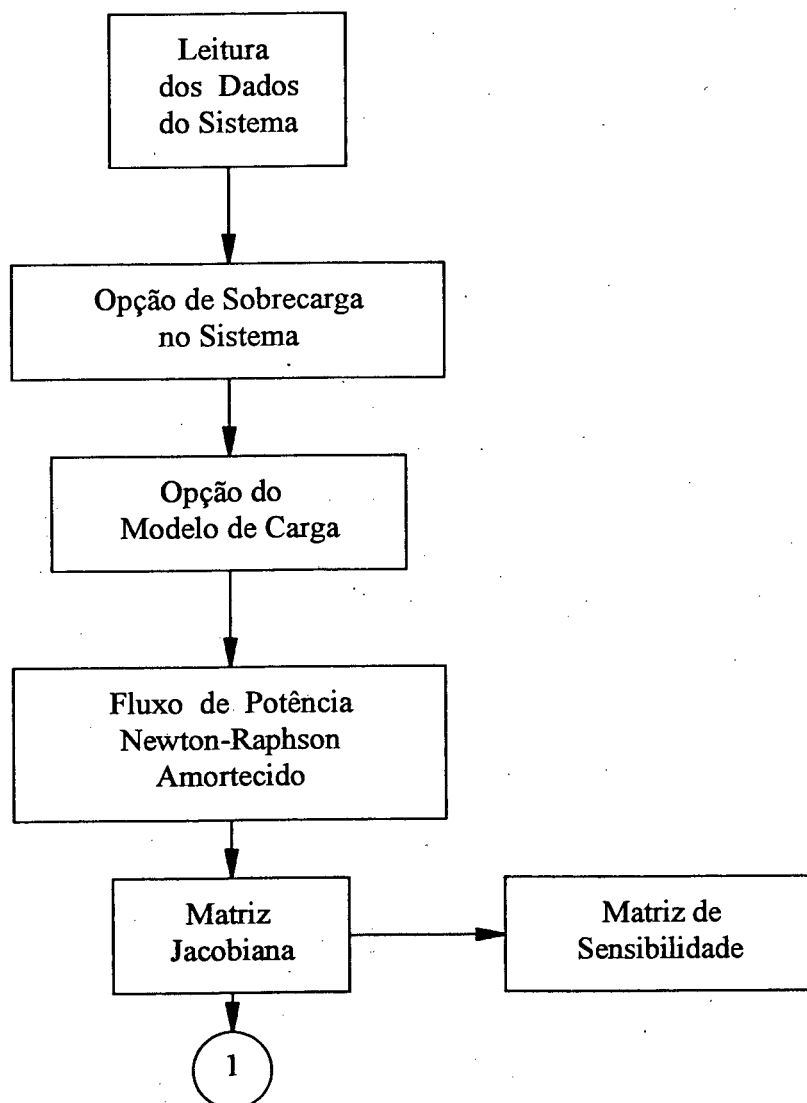
A rotina de cálculo de Decomposição em Valores Singulares (SVD) utiliza rotinas da biblioteca matemática LINPACK[44]. Através destas rotinas foram obtidos os valores singulares das matrizes analisadas (seção 4.1) e de seus respectivos vetores singulares, a partir da matriz Jacobiana fornecida pelo método de Newton-Raphson amortecido.

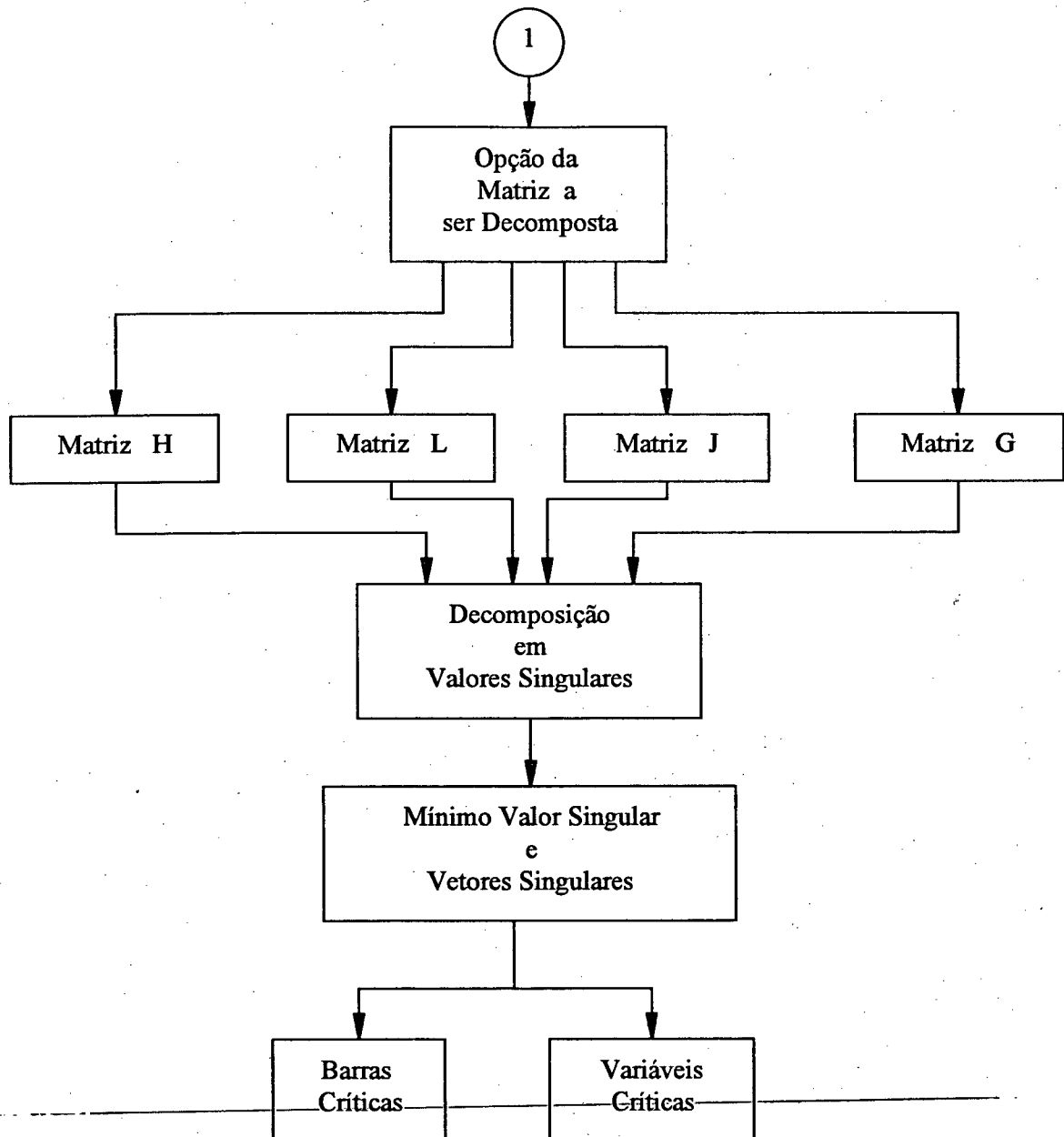
A rotina de análise das condições de estabilidade de tensão do sistema foi desenvolvida para facilitar a apresentação dos dados das simulações, tais como classificação dos valores singulares com relação as variáveis das barras críticas do sistema, e outras, as quais possibilitam rapidez na análise dos resultados.

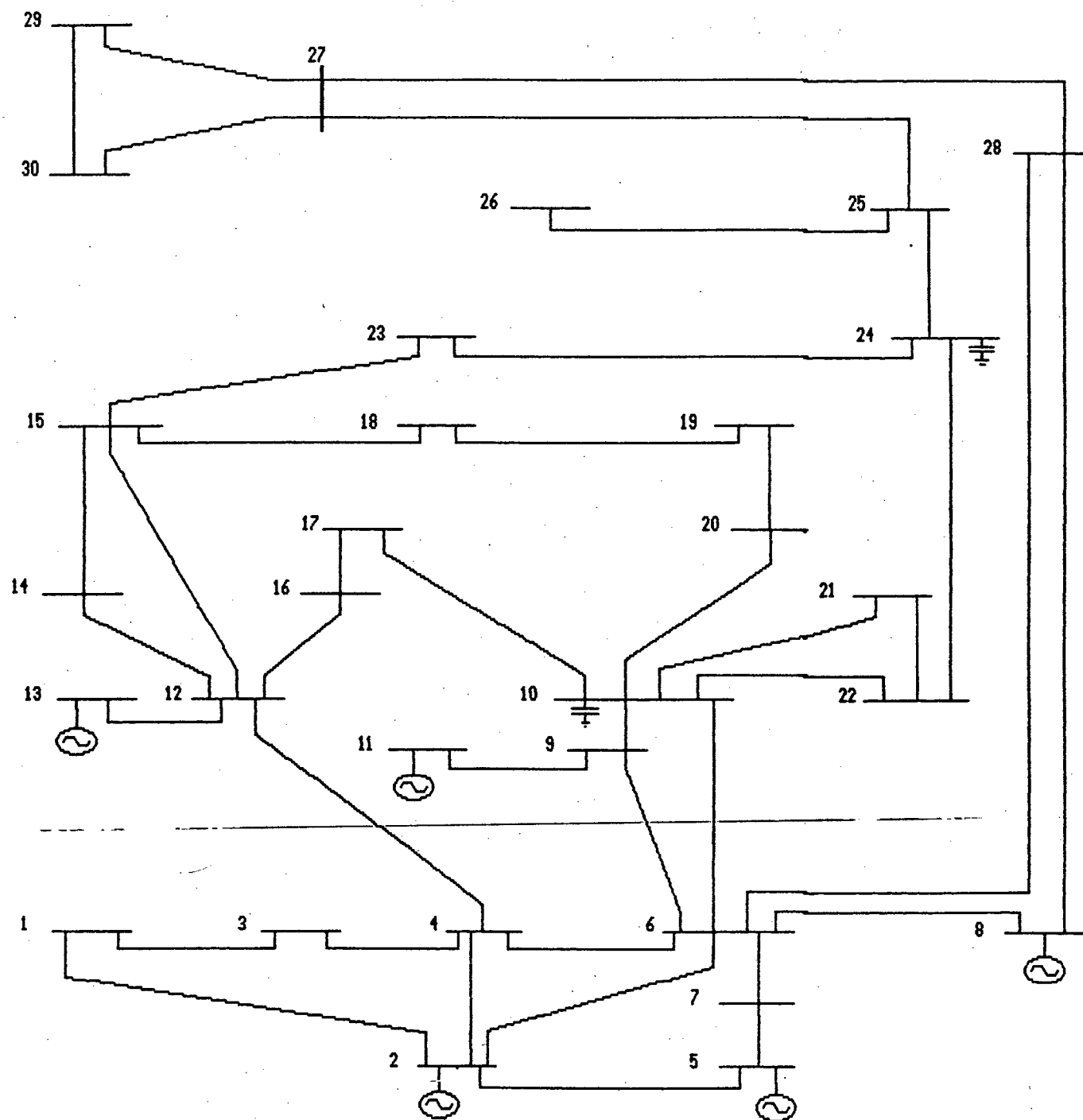
O sistema DAMPNR possui outras facilidades de operação, podendo sua execução ser controlada iterativamente pelo usuário ou através de opções de execução no arquivo de dados.

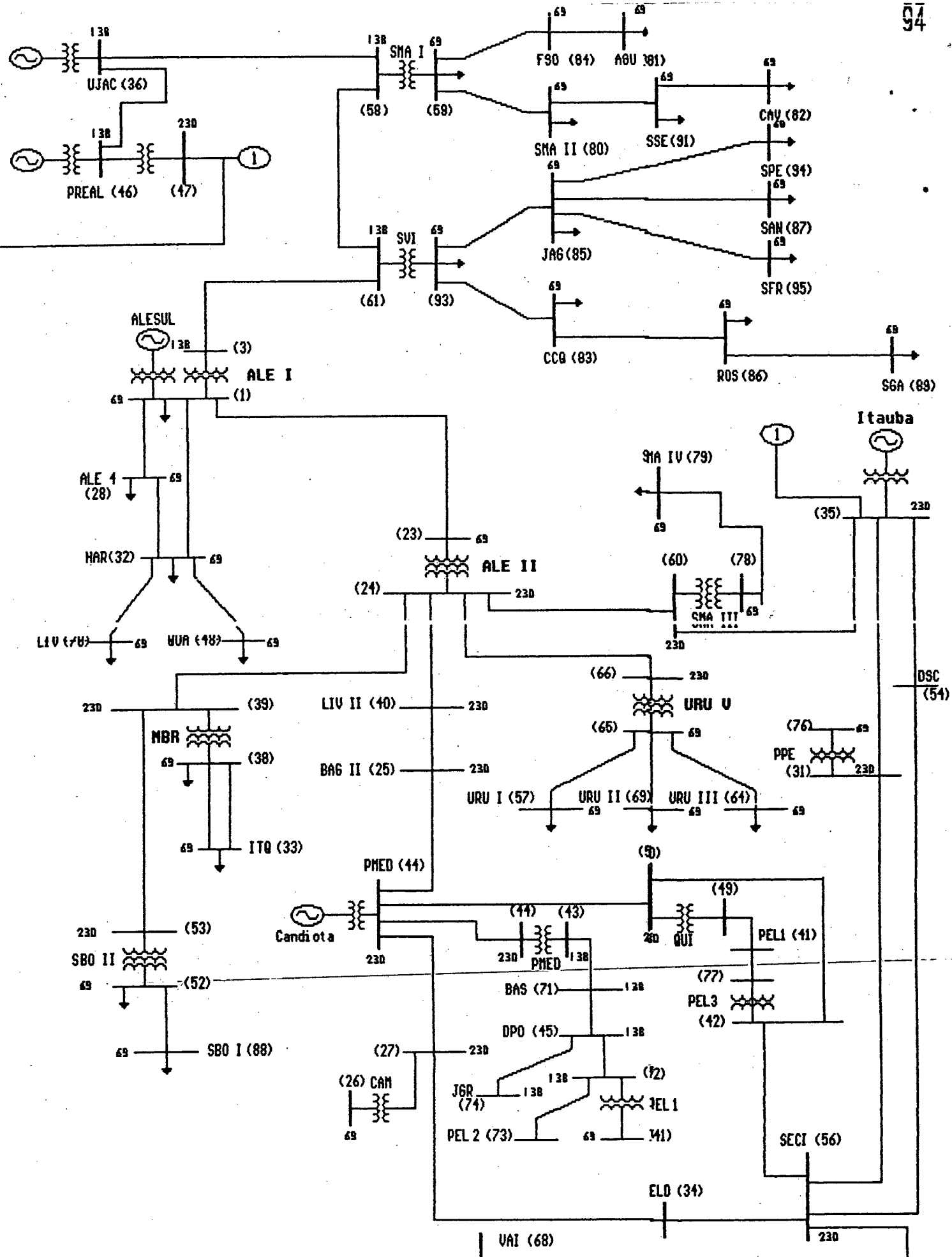
O sistema DAMPNR foi desenvolvido em linguagem FORTRAN (Compilador Lahey), e encontra-se implementado em versão para microcomputadores IBM-PC compatíveis padrão 386 ou superior, estando disponível para uso no Labspot.

A seguir é apresentado um diagrama que ilustra o fluxo de execução do programa.









APENDICE A2 - SISTEMA OESTE (C. E. E. E.)